La grande eclissi di Sole del 2017

Le Scienze

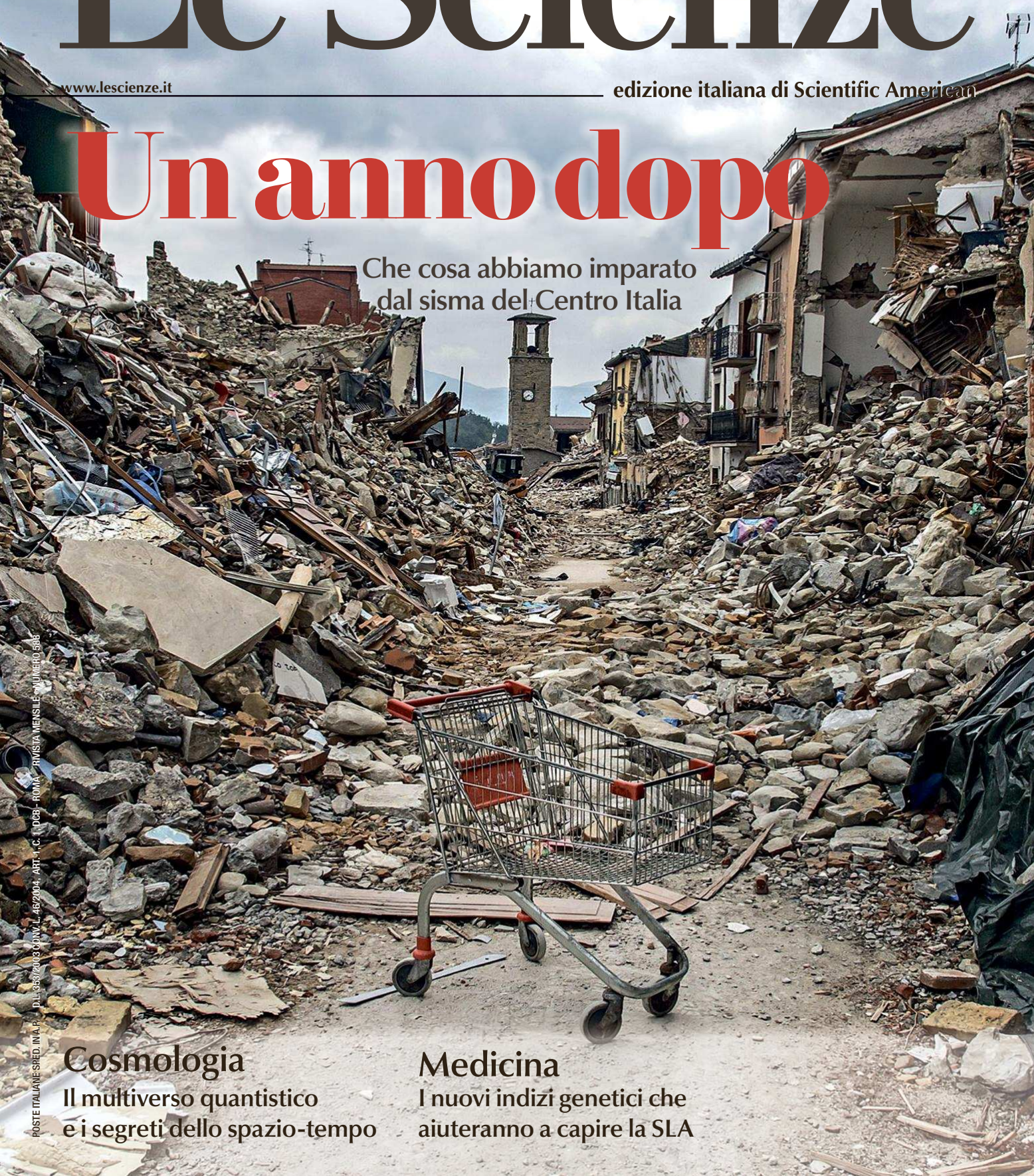
Agosto 2017

€ 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

Un anno dopo

Che cosa abbiamo imparato dal sisma del Centro Italia

Cosmologia

Il multiverso quantistico e i segreti dello spazio-tempo

Medicina

I nuovi indizi genetici che aiuteranno a capire la SLA

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA - RIVISTA MENSILE - NUMERO 588

IN COPERTINA

Gli eventi sismici in Italia centrale iniziati il 24 agosto 2016 proseguono ancora oggi con un'evoluzione che lascia perplessi gli scienziati, suggerendo che nei prossimi anni potrebbero attivarsi altre zone. (Stefano Dal Pozzolo/Contrasto)

Sommario

agosto 2017 numero 588

Giuseppe Bellini/Stringer/Getty Images

Sommario

10

16

18

Rubriche

SCIENZA NEWS

Cortesia Joan Costa/CSIC (*in basso*); Maryam Mirzakhani/Corbis via Getty Images (*al centro*); Thomas Deerinck, NCMIR/Science Photo Library/AGF (*in alto*)

Le Scienze S.p.A.

Via Cristoforo Colombo, 90 - 00147 Roma

Codice fiscale, Iscrizione presso il Registro delle Imprese e Partita Iva n. 00882050156

Bilancio al 31 dicembre 2016

(pubblicato a norma dell'art. 1, comma 33, del D.L. 23 ottobre 1996 n. 545 convertito con legge 23 dicembre 1996 n. 650)

Stato Patrimoniale

euro

ATTIVO	31-12-2015	31-12-2016
A - Crediti verso soci per versamenti ancora dovuti	-	-
B - Immobilizzazioni		
I. Immobilizzazioni immateriali		
Concessioni, licenze, marchi e diritti simili	-	-
TOTALE IMMOBILIZZAZIONI IMMATERIALI	-	-
II. Immobilizzazioni materiali		
Impianti e macchinari	-	-
Mobili, dotazioni e automezzi	0	0
Altri beni	-	-
TOTALE IMMOBILIZZAZIONI MATERIALI	**0**	**0**
III. Immobilizzazioni finanziarie		
Partecipazioni in		
- altre imprese	665	665
Crediti		
- verso altri	0	5.100
TOTALE IMMOBILIZZAZIONI FINANZIARIE	665	5.765
TOTALE IMMOBILIZZAZIONI	**665**	**5.765**
C - Attivo circolante		
I. Rimanenze		
Materie prime, sussidiarie, di consumo	40.494	37.836
Prodotti finiti e merci	73.200	53.174
TOTALE RIMANENZE	**113.693**	**91.010**
II. Crediti		
Verso clienti	94.941	88.664
Crediti verso imprese correlate	843.644	1.229.067
Crediti tributari	1.320.705	377.820
Imposte anticipate	57.149	61.505
Verso altri	44.661	32.327
TOTALE CREDITI	**2.361.100**	**1.789.383**
IV. Disponibilità liquide		
Depositi bancari e postali	833.334	1.416.573
Denaro e valori in cassa	133	132
TOTALE DISPONIBILITÀ LIQUIDE	833.467	1.416.705
TOTALE ATTIVO CIRCOLANTE	**3.308.260**	**3.297.097**
D - Ratei e risconti		
Altri ratei e risconti attivi	42.363	14.726
TOTALE RATEI E RISCONTI	**42.363**	**14.726**
TOTALE ATTIVO	**3.351.288**	**3.317.588**

euro

PASSIVO	31-12-2015	31-12-2016
A - Patrimonio netto		
I. Capitale	103.400	103.400
II. Riserva sovrapprezzo azioni	-	-
III. Riserve di rivalutazione	-	-
IV. Riserva legale	20.680	20.680
V. Riserve statutarie	-	-
VI. Riserva per azioni proprie in portafoglio	-	-
VII. Altre riserve	-	-
VIII. Utili (perdite) portati a nuovo	22.201	51.039
IX. Utile (perdita) dell'esercizio	28.838	135.175
PATRIMONIO NETTO	**175.119**	**310.294**
B - Fondi per rischi ed oneri		
Fondi per trattamento di quiescenza ed obblighi simili	4.204	4.204
TOTALE FONDI PER RISCHI ED ONERI	**4.204**	**4.204**
C - Trattamento di fine rapporto di lavoro subordinato	**114.880**	**119.924**
D - Debiti		
Debiti verso fornitori	333.875	303.386
Debiti verso imprese correlate	1.461.705	1.222.030
Debiti tributari	26.584	78.465
Debiti verso istituti di previdenza e di sicurezza sociale	59.040	63.638
Altri debiti	96.568	111.123
TOTALE DEBITI	**1.977.771**	**1.778.642**
E - Ratei e risconti	**1.079.314**	**1.104.524**
TOTALE PASSIVO	**3.351.288**	**3.317.588**

Conto Economico

euro

	2015	2016
A - Valore della produzione		
Ricavi delle vendite e delle prestazioni	3.149.496	3.251.424
Variazione delle rimanenze di prodotti in corso di lavorazione, semilavorati e finiti	14.022	(20.026)
Altri ricavi e proventi	27.170	36.656
TOTALE VALORE DELLA PRODUZIONE	**3.190.688**	**3.268.054**
B - Costi della produzione		
Per materie prime, sussidiarie, di consumo e di merci	321.984	243.895
Per servizi	1.852.768	1.753.040
Per godimento di beni di terzi	333.091	381.325
Per il personale:		
- Salari e stipendi	402.495	410.124
- Oneri sociali	116.466	127.821
- Trattamento di fine rapporto	29.815	30.322
- Trattamento di quiescenza e simili	-	-
- Altri costi	8.557	9.571
Ammortamenti e svalutazioni:		
- Ammortamenti delle immobilizzazioni immateriali	-	-
- Ammortamenti delle immobilizzazioni materiali	361	-
Variazione delle rimanenze di materie prime, sussidiarie, di consumo e merci	9.176	2.657
Oneri diversi di gestione	44.057	72.446
TOTALE COSTI DELLA PRODUZIONE	**3.118.772**	**3.031.201**
DIFFERENZA TRA VALORE E COSTI DELLA PRODUZIONE	**71.916**	**236.853**

euro

	2015	2016
C - Proventi ed oneri finanziari		
Altri proventi finanziari		
- Da terzi	3.716	1.122
Utile su cambi	-	-
Altri oneri finanziari		
- Verso terzi	(4.729)	(3.695)
Perdite su cambi	(19)	44
TOTALE PROVENTI ED ONERI FINANZIARI	**(1.032)**	**(2.528)**
D - Rettifiche di valore di attività finanziarie	**-**	-
TOTALE DELLE RETTIFICHE	**-**	-
Risultato prima delle imposte	**70.884**	**234.325**
Imposte sul reddito dell'esercizio, correnti, differite e anticipate:		
- Imposte correnti	(50.779)	(103.505)
- Imposte anticipate (differite)	8.733	4.355
Totale imposte	**(42.046)**	**(99.150)**
UTILE (PERDITA) DELL'ESERCIZIO	**28.838**	135.175

Prospetto di dettaglio delle voci del bilancio di esercizio al 31 dicembre 2016

(pubblicato a norma dell'art. 1, comma 33, del D.L. 23 ottobre 1996 n. 545 convertito con legge 23 dicembre 1996 n. 650)

01	Vendita di copie	**2.712.932**
02	Pubblicità	**90.922**
05	Ricavi da editoria on line	**78.469**
06	- Abbonamenti	21.793
07	- Pubblicità	56.676
09	Ricavi da altra attività editoriale	**369.102**
	Totale voci 01+02+05+09	**3.251.424**

di Marco Cattaneo

Prepararsi al sisma

Oggi la prevenzione è l'unico strumento che abbiamo

Da quel 24 agosto 2016 in cui all'improvviso, un'altra volta, l'Italia centrale ha cominciato a tremare, è trascorso quasi un anno. Senza preavviso, questa volta, a differenza di quanto era accaduto all'Aquila sette anni prima, una scossa di magnitudo 6.0 ha lacerato la notte di Accumoli, Amatrice e tanti altri centri del reatino, provocando trecento vittime.

Da allora, oltre alle altre violente scosse del 26 e del 30 ottobre, e del 18 gennaio di quest'anno, i sismografi hanno registrato decine di migliaia di aftershock, che nei primi giorni si susseguivano al ritmo di diverse centinaia al giorno: uno ogni pochi minuti. Le scosse successive hanno provocato solo tre vittime indirette, persone morte per infarto, ma la sequenza sismica che dura ormai da un anno ha messo in ginocchio cittadine e borghi, da Castelsantangelo sul Nera a Visso, da Ussita a Norcia, a Castelluccio.

Dei problemi della ricostruzione già sappiamo. Ne parlano le cronache, e presumibilmente ne parleranno ancora a lungo, tra ritardi, scarsi finanziamenti e paradossali ostacoli burocratici. Peggio ancora se si pensa che un mese fa, all'inizio di luglio, Confindustria denunciava il blocco di centinaia di cantieri della ricostruzione post sisma a causa della lentezza nello sbrigare le pratiche; non i cantieri di questo sisma, quelli dell'Aquila.

Dal punto di vista scientifico, la sequenza sismica iniziata il 24 agosto scorso e ancora in corso (anche se gli eventi stanno riducendosi in numero e in intensità) pone ancora molti interrogativi. Soprattutto per la complessità degli eventi e del sottosuolo, in cui si sono attivate diverse faglie. Ce lo raccontano Alessandro Amato e Daniela Pantosti, dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia, nel servizio di copertina di questo numero.

Amato e Pantosti si soffermano anche sulla diversità dei danni subiti da Amatrice e Norcia, sebbene la scossa del 30 ottobre con epicentro a Norcia sia stata di magnitudo maggiore. A differenza di Amatrice, sottolineano gli autori, il Comune umbro aveva subito danni rilevanti da terremoti piuttosto recenti, l'ultimo nel 1979. E in qualche modo è arrivato preparato al sisma del 2016. Ad Amatrice, invece, gli eventi distruttivi più recenti risalivano al Settecento, e le modalità costruttive adottate non erano adeguate.

Belfiore/Sync/AGF

Così, ancora una volta, la lezione che dovremmo imparare dall'ennesima tragedia nazionale è che il primo e per ora l'unico strumento di cui disponiamo per limitare i danni di sismi catastrofici è la prevenzione: ridurre la vulnerabilità degli edifici. Lo abbiamo detto dopo L'Aquila, e ancora dopo l'Emilia, e non ci stancheremo di ripeterlo.

L'Italia è un paese a elevato rischio sismico, dal 1700 a oggi si è verificato un terremoto di magnitudo 6 o superiore in media ogni sette anni. Per arginarne le conseguenze dobbiamo mettere in sicurezza il nostro patrimonio edilizio. Sistematicamente, e in tutte le aree a rischio. Possibilmente prima di dover seppellire altre centinaia di morti.

La matematica del calcio

A richiesta con il numero di settembre *Geometrie in campo,* di David Sumpter

C'è un settore dei *big data* che non ha nulla a che fare con gli esperimenti di scienza, piccoli o grandi che siano; riguarda invece un rettangolo verde attorno al quale ogni domenica (ma anche sabato e lunedì, e mercoledì o giovedì) milioni di persone si riuniscono, anche in modo virtuale – per esempio sdraiate sul divano – pronte ad assistere all'ennesima partita della squadra del cuore. Ebbene sì, anche il mondo del calcio è ormai sommerso da un diluvio di dati, grazie allo sviluppo di tecnologie che permettono di registrare dati in tempo reale per ciascun giocatore seguendo diversi parametri.

Tutti questi bit sono di aiuto per lo sviluppo di modelli matematici che descrivono, per esempio, comportamenti collettivi, proprio come accade per i sistemi biologici studiati dagli scienziati. Ma il rapporto tra calcio e scienza, in particolare la matematica, non si ferma qui, come spiega *Geometrie in campo*, libro allegato a richiesta con «Le Scienze» di settembre e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni. L'autore, David Sumpter, è uno del mestiere, ovvero è professore di matematica applicata all'Università di Uppsala, in Svezia, dove dirige il Collective Behaviour Research Group, ed è anche un appassionato di calcio. Per sua stessa ammissione, Sumpter ama la matematica quasi quanto il gioco del pallone, che nel libro è mostrato in un modo diverso da quello che abitualmente passa sulla televisione e sui giornali.

Dopo aver letto *Geometrie in campo*, guarderete il calcio con occhi diversi: non più come uno sport in cui i movimenti dei singoli sono confusionari e a un dato istante, per una qualche magia, o per le urla dell'allenatore, assumono caratteristiche collettive; o ancora, uno sport in cui è solo l'episodio a fare la differenza tra vittoria e sconfitta, tra un posto nella storia o l'oblio assoluto.

Un esempio illustrato nel libro riguarda il calcio totale giocato dall'Ajax e dalla nazionale olandese negli anni settanta e ottanta. Pur non arrivando alla conquista della Coppa del Mondo, questo stile di gioco ha dominato i campi di calcio a tutte le latitudini, inaugurando una visione tattica e strategica ripresa ancora oggi da molte squadre. Il calcio totale olandese, come anche quello praticato dalle squadre dell'allenatore sovietico Valerij Lobanovs'kij tra gli anni settanta e ottanta, era basato su una sorta di individualismo collettivo: la prestazione di una squadra può superare quella della somma delle sue parti. Un po' come le colonie delle formiche.

Un altro esempio di matematica applicata al pallone riguarda il Barcellona di Pep Guardiola e di Luis Enrique. Sumpter guida il lettore nelle geometrie e nella dinamica del *tiki-taka*, mostrando la letalità sportiva di una strategia di gioco che oltre alla solidità scientifica può contare su giocatori di *élite*, tipo Messi, Neymar e Iniesta. C'è spazio anche per la teoria dei giochi applicata alle scommesse, per le capacità balistiche di Zlatan Ibrahimovic e dei grandi attaccanti, e c'è spazio anche per il mondo dei tifosi, per esempio con le dinamiche del comportamento collettivo grazie a cui emergono la *ola* negli stadi e i cori che caratterizzano le partite.

Tra campo, panchina e pubblico, Sumpter mostra come la matematica possa svelare aspetti del calcio difficili da cogliere nell'immediato. Ma questo disvelare non toglie nulla alla magia del gioco. Anzi, paradossalmente, aiuta ad apprezzare ancora di più l'emozione di un gesto tecnico imprevedibile che rompe gli schemi e sposta equilibri che sembravano eterni.

Tim Williams/Actionplus/AGF

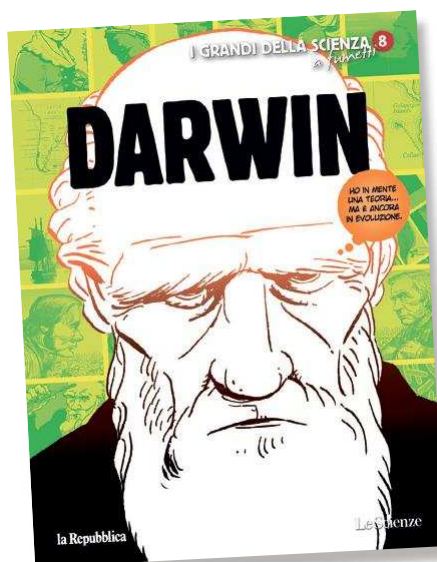
Storie di grandi scienziati

Ad agosto quattro uscite della collana settimanale *I grandi della scienza a fumetti*

Anche ad agosto è tempo di fumetti. Questo mese proseguono le uscite per *I grandi della scienza a fumetti*, una collana settimanale di otto volumi, alcuni inediti in lingua italiana, dedicata a grandi scienziati e grandi imprese scientifiche dell'era moderna.

Il 5 agosto, con 9,90 euro, sarà possibile acquistare in edicola *Trinity*, di Jonathan Fetter-Vorm. In questa *graphic novel* l'autore illustra la storia del Progetto Manhattan, la grande impresa di scienza applicata al settore militare, grazie a cui durante la seconda guerra mondiale gli Stati Uniti arrivarono per primi alla costruzione di ordigni nucleari; un percorso culminato con lo sganciamento di bombe atomiche sulle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki, rispettivamente il 6 e il 9 agosto 1945: dunque la data di uscita di *Trinity* non è casuale. Il sabato successivo, il 12 agosto, sarà possibile acquistare *Un pensiero abbagliante* di Jim Ottaviani e Leland Pirvus, una biografia del fisico danese Niels Bohr, pioniere della meccanica quantistica, la teoria con cui descrivere il mondo di atomi e particelle subatomiche caratterizzato da fenomeni controintuitivi.

Il 19 agosto sarà il momento dello spazio. *T-minus*, firmata Ottaviani, Zander Cannon e Kevin Cannon. La storia è quella della corsa alla Luna tra Stati Uniti e Unione Sovietica, che nel 1969 portò il primo essere umano sul nostro satellite.

L'ultima graphic novel, di Eugene Byrne e Simon Gurr, in edicola il 26 agosto, è una biografia di Charles Darwin, il naturalista britannico che detronizzò l'essere umano dallo scranno più alto del regno animale. Buona lettura!

PIANO DELL'OPERA

8 LUGLIO 2017
Feynman
Una mente brillante del XX secolo

15 LUGLIO
The Imitation Game
L'enigma di Alan Turing

22 LUGLIO
Logicomix
Bertrand Russell e la ricerca della verità

29 LUGLIO
Cosmicomic
Gli uomini che scoprirono il big bang

5 AGOSTO
Trinity
La storia della prima bomba atomica

12 AGOSTO
Un pensiero abbagliante
Niels Bohr e la fisica dei quanti

19 AGOSTO
T-minus
La corsa alla Luna

26 AGOSTO
Darwin
Il padre di una teoria rivoluzionaria

di Roberta Villa

Un pioniere degli antivirali

Lo scienziato che ha sviluppato il farmaco contro l'epatite C e altre molecole per combattere il virus dell'AIDS racconta la sua storia professionale

Raymond Schinazi è l'uomo che ha sviluppato il maggior numero di farmaci antivirali al mondo: otto, tutti fondamentali. Quelli contro l'AIDS hanno regalato moltissimi anni di vita a milioni di persone e il sofosbuvir che ha messo a punto contro l'epatite C ne ha già salvate centinaia di migliaia, aprendo la strada ad altre cure che hanno rivoluzionato la storia di questa malattia.

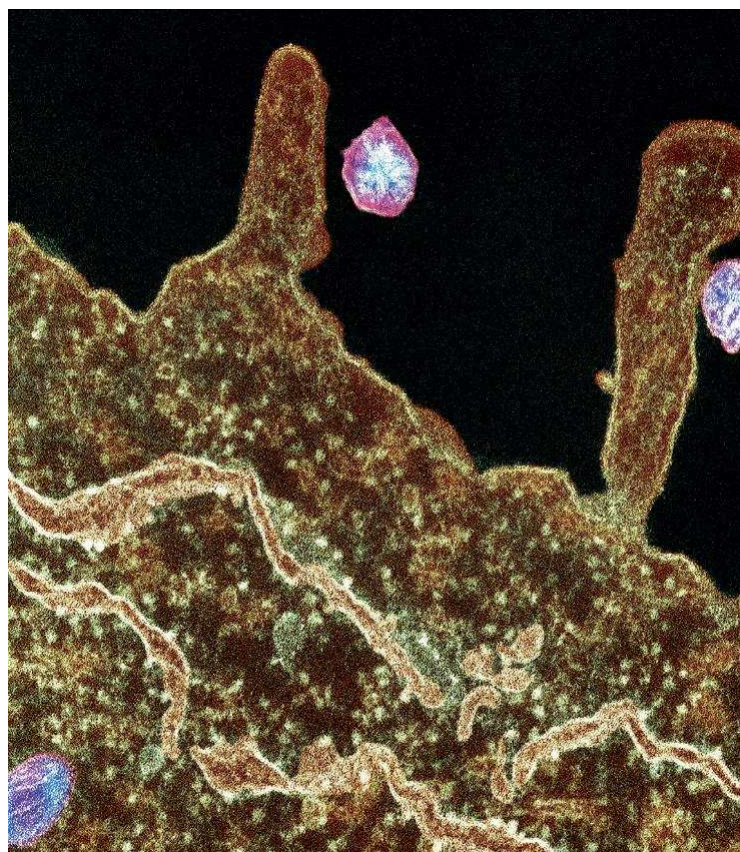
La sua storia umana e scientifica meriterebbe un film. La racconta in una sola immagine una fotografia che lo scienziato porta sempre con sé nel cellulare, e che lo vede ritratto sorridente insieme a un gruppo di militari egiziani. Per uno di quegli strani scherzi della storia e del destino, lo stesso esercito che ai tempi di Nasser aveva spinto alla fuga la sua famiglia, insieme agli altri ebrei che vivevano in Egitto, lo riaccoglieva in patria come un eroe, per aver messo a punto il farmaco contro l'epatite C, che proprio lì è diffusa come in nessun'altra parte del mondo: una persona su cinque, anche nell'esercito, è portatrice del virus.

Come mai questa peculiarità dell'Egitto?

Perché Nasser, in quegli stessi anni, aveva dato il via a una campagna per il trattamento di massa della schistosomiasi, una parassitosi allora endemica nel paese. Le iniezioni intramuscolari di composti antimoniali, effettutate con scarsa attenzione alla sterilità, avevano diffuso in maniera capillare e silenziosa nella popolazione il virus dell'epatite C, che a quei tempi ancora non era nemmeno stato scoperto.

E lei, che da Nasser era stato cacciato, ha trovato un rimedio efficace. Il sofosbuvir è anche il primo farmaco capace di curare una infezione virale cronica, inserendola quindi a pieno titolo tra coloro che hanno fatto la storia della medicina: che impressione le fa?

Veramente non penso che sia stata questa la mia scoperta più importante. Sono ancora più orgoglioso dei risultati raggiunti nei confronti dell'AIDS, che per gravità e rapidità di evoluzione aveva un impatto molto maggiore di quello dell'epatite C. Tra gli anni ottanta e novanta la malattia stava facendo una strage, a cui riuscimmo a mettere un freno con la scoperta di due molecole, emtricitabina (in sigla FTC) e lamivudina (meglio nota come 3TC), che non solo erano capaci di inattivare il virus, ma erano ben tollerate anche da chi le doveva assumere quotidianamente e in maniera cronica.

Quei medicinali, per uno dei quali è già scaduto il brevetto, hanno rappresentato un punto di svolta fondamentale per lo sviluppo della successiva classe di farmaci, gli inibitori delle proteasi (HAART, Highly Active AntiRetroviral Therapy), ma sono ancora fondamentali nei protocolli terapeutici: circa il 94 per cento dei pazienti con questa malattia in tutto il mondo prende ogni giorno almeno una delle medicine che ho messo a punto alla Emory University di Atlanta.

Thomas Deerinck, NCMIR/Science Photo Library/AGF

Quale fu il passo successivo?

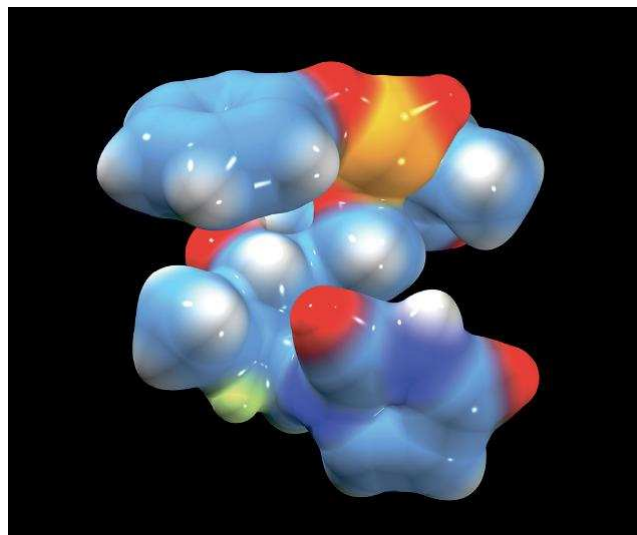
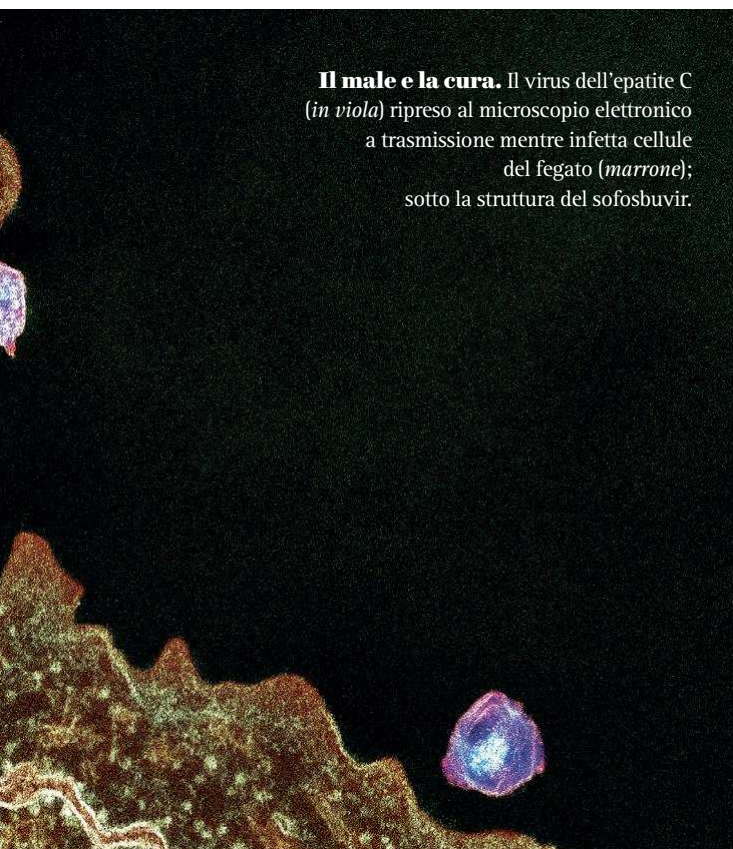
Il 3TC, messo a punto contro l'HIV, si rivelò poi utile anche nei confronti dell'epatite B, un'altra malattia con un carico globale pesantissimo, nonostante una vaccinazione efficace che non è ancora riuscita a eliminare il virus. La cura non era efficace come quella che avremmo poi scoperto per l'epatite C, ma aveva comunque meno effetti collaterali dell'interferone, che fino a quel momento era l'unica terapia disponibile.

Torniamo al sofosbuvir contro l'epatite C: come è arrivato proprio lei a questo risultato dopo che tanti altri avevano fallito?

Sicuramente abbiamo avuto anche fortuna, oltre all'esperienza che ci portavamo dietro dalla lotta contro gli altri virus, soprattutto l'HIV. Il primo colpo di fortuna fu che il virus dell'epatite C,

CHI È

Raymond Schinazi, seppur nato in Egitto, rivendica la sua nazionalità italiana di origine, e ricorda con gratitudine l'accoglienza ricevuta a Napoli come profugo. Tutta la sua carriera, però, dopo gli studi in chimica organica e biotecnologie all'Università di Bath, in Regno Unito, si è svolta negli Stati Uniti: alla Yale University e all'Emory University di Atlanta, dove è diventato un pioniere nella lotta contro l'AIDS e l'epatite B e C.
Ha fondato diverse aziende per lo sviluppo di farmaci, poi di volta in volta rivendute ai colossi dell'industria, per cui rappresenta un tipico esponente della categoria dello scienziato-imprenditore.
Tra tante cariche accademiche e di ricerca è direttore del Laboratorio di farmacologia biochimica alla Emory. Detiene più di 100 brevetti e ha firmato più di 500 articoli in riviste peer-reviewed.

Il male e la cura. Il virus dell'epatite C (*in viola*) ripreso al microscopio elettronico a trasmissione mentre infetta cellule del fegato (*marrone*); sotto la struttura del sofosbuvir.

Dr Tim Evans/Science Photo Library/AGF (*struttura sofosbuvir*); cortesia Schinazi (*Schinazi*)

diversamente dall'HIV, non si integra nel DNA dell'ospite, e quindi non riesce a nascondersi così facilmente all'attacco dei farmaci. Un altro aspetto per cui possiamo ritenerci fortunati è che si tratta, per così dire, di un virus «zoppo», che si poteva quindi eliminare con facilità. Il nuovo farmaco riusciva a farlo sparire dal sangue in sole 12 settimane (ora è stato dimostrato che, a seconda dei casi, la cura può essere anche più breve), senza nessun effetto collaterale di rilievo. Per questo qualcuno voleva chiamarlo «perfectovir».

Il sofosbuvir è andato in prima pagina per la sua efficacia, ma anche per i suoi costi, che hanno reso difficilmente sostenibile la terapia anche nei paesi più ricchi. Che cosa ne pensa?

Sono d'accordo che il prezzo iniziale posto da Gilead al farmaco, di circa 1000 dollari a compressa, che significava oltre 80.000 dollari per la cura completa, era eccessivo. D'altra parte l'azienda si è assunta un grosso rischio quando ha acquistato per 11 miliardi di dollari l'azienda *biotech* Pharmasset che io avevo fondato. Nel prezzo erano compresi i diritti per due molecole, entrambe in dirittura di arrivo, a pochi mesi dall'approvazione da parte della Food and Drug Administration. Come non sono riusciti a registrare l'altro farmaco, potevano fallire anche con sofosbuvir, e in quel caso l'investimento sarebbe andato a vuoto. Nella mia vita ho fondato diverse biotech, ed è capitato anche a me di puntare sul cavallo sbagliato e perdere molto denaro.

Questa sua figura di scienziato-imprenditore è molto innovativa. Nel percorso dall'accademia all'industria che lei personifica, le aziende non finiscono però per approfittare della ricerca di base finanziata con denaro pubblico?

Assolutamente no. È vero che oggi molte aziende farmaceutiche acquistano biotech nate come *spin-off* dalle università, invece di condurre il percorso di ricerca dalla base, ma nel mio caso sono stato costretto a fondarle, mettendoci denaro mio, perché non ricevevo finanziamenti pubblici sufficienti a portare avanti il lavoro. Il sofosbuvir è stato messo a punto da Pharmasset, non all'Emory University. Al momento della cessione, non facevo più parte del *board*, ma avrebbe potuto essere ceduta al governo, se fosse stata fatta un'offerta paragonabile a quella di Gilead.

Solo per quest'ultima transazione, lei ha ricevuto 400 milioni di dollari lordi.

I farmaci efficaci e sicuri hanno questo effetto collaterale, che fanno guadagnare soldi. Ma se facessi ricerca per denaro, e non per salvare vite, avrei già appeso il camice al chiodo. Invece, continuo a lavorare senza tregua, insieme alle oltre 50 persone del laboratorio che dirigo. E con quei soldi stiamo ora cercando una cura per l'epatite B e altri virus emergenti.

di Letizia Gabaglio

I geni dell'immunoterapia

Genenta punta a una cura a base di staminali geneticamente modificate per produrre una molecola con azione antinfiammatoria e antitumorale

Il sistema immunitario è diventato la star della medicina presente e futura: sono molte le terapie che cercano di sfruttare le difese dell'organismo umano per combattere diverse malattie, prima fra tutte quell'insieme variegato di condizioni che va sotto il nome di cancro. L'immuno-oncologia è ormai considerata a tutti gli effetti la quarta via – dopo chirurgia, chemio e radioterapia – che la ricerca scientifica ha saputo aprire e iniziato a percorrere, anche se di strada ce ne è ancora tanta davanti. Il sistema immunitario però si può sfruttare in tanti modi e in Italia ci sono realtà che hanno deciso di abbinare a questo approccio un'altra strategia di ultima generazione, la terapia genica.

Il mix delle due innovazioni è l'immunoterapia genica, nata a partire dalle ricerche effettuate da Luigi Naldini, direttore dell'Istituto San Raffaele-Telethon per la terapia genica (TIGET) e della divisione di medicina rigenerativa, cellule staminali e terapia genica dell'Ospedale San Raffaele di Milano.

Potenza dei lentivirus

Dall'incontro tra il genetista e quello che potrebbe essere definito un innovatore seriale, Pierluigi Paracchi, è nata invece l'azienda che si impegna a portare sul mercato l'intuizione nata nei laboratori milanesi. «Quando ho incontrato Naldini e lui mi ha raccontato la scienza su cui stava lavorando, ho immaginato subito le enormi potenzialità industriali della sua ricerca. Ho quindi messo sul piatto le mie competenze "bio" imprenditoriali e su queste due componenti, scienza e imprenditoria, abbiamo deciso di fondare Genenta», racconta Paracchi che è amministratore delegato dell'azienda.

Il fiuto di Paracchi per i buoni affari nel campo delle scienze della vita lo guida da decenni alla scoperta di realtà in cui investire. Poco prima di incontrare Naldini aveva investito in una promettente azienda biotech italiana, EOS, poi venduta alla statunitense Clovis Oncology per 420 milioni di dollari. Così nel 2014 può gettarsi in questa nuova avventura: «Fino a quel momento avevo lavorato a progetti per farmaci a base di piccole molecole, ma con Genenta dobbiamo affrontare una complessità maggiore perché lavoriamo su geni e cellule. Nello specifico abbiamo una strategia antitumorale basata su un approccio di *gene therapy ex-vivo*», sottolinea Paracchi. Con lui e Naldini, soci dell'azienda sono anche l'Ospedale San Raffaele, di cui di fatto l'azienda è una *start-up*, e Bernhard Gentner, ematologo e ricercatore all'Ospedale San Raffaele e presso l'Istituto San Raffaele-Telethon per la terapia genica.

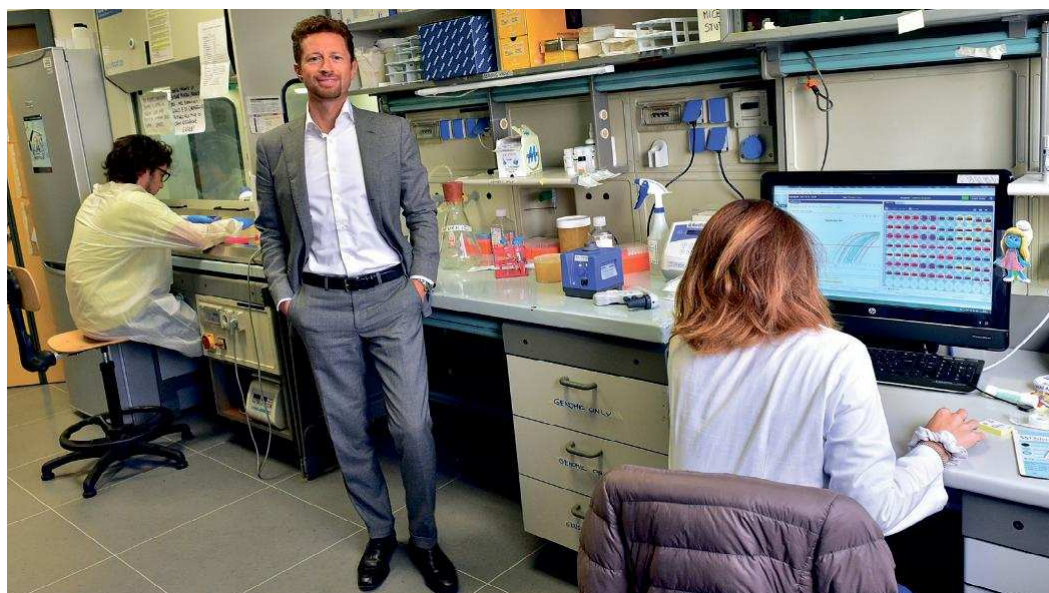
Ma come funziona il sistema messo a punto da Naldini? L'idea è armare con uno specifico gene le cellule staminali, indifferenziate, del midollo osseo. Quando queste staminali si differenziano, in particolare in specifici monociti e macrofagi, e si infiltrano nei tumori, producono una proteina, l'interferone-α, capace di contrastare il tumore. L'interferone, prodotto dall'organismo umano in risposta alle infezioni è già in uso in alcune terapie ma in maniera limitata a causa della sua tossicità. Tuttavia nel caso della terapia messa a punto da Genenta, le cellule staminali sono state programmate in modo che la sostanza sia rilasciata solo dove serve, limitando in questo modo gli effetti collaterali.

Quello che rende unica la strategia di Genenta è l'uso di un lentivirus, l'HIV per intendersi, opportunamente «smontato» in modo da non essere nocivo pur mantenendo la sua capacità di introdursi con successo nelle cellule e di integrarsi nel loro DNA. «Il virus viene modificato in modo da contenere le istruzioni per produrre

LA SCHEDA

Genenta

Fatturato n.d.	**Investimenti in ricerca** 3 milioni di euro
Dipendenti/collaboratori 10 di cui 8 impiegati in R&S	**Brevetti rilasciati** 5

Science Photo Library/AGF

I protagonisti. Pierluigi Paracchi nei laboratori di Genenta; al centro, provette con campioni di sangue da analizzare, in basso macrofagi (*in bianco*) attaccano una cellula tumorale in una foto al microscopio elettronico a scansione.

Cortesia Genenta (*in alto*); Science Vu, Visuals Unlimited / Science Photo Library/AGF (*accanto*)

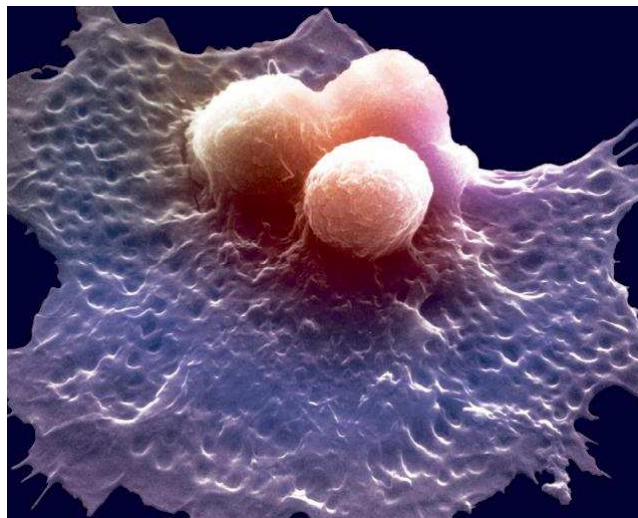
l'interferone e alcuni altri codici necessari per azionare la terapia proprio in prossimità del tumore», spiega Paracchi.

E che l'uso dei lentivirus sia efficace lo dimostrano i risultati ottenuti da Naldini nella terapia di alcune malattie rare che hanno portato alla registrazione della prima terapia genica al mondo, Strimvelis, realizzata grazie alla partnership dell'Istituto San Raffaele-Telethon per la terapia genica con l'azienda farmaceutica GSK. Ma questa volta Genenta ha messo nel mirino il tumore, iniziando da quelli del sangue, mielomi e linfomi, per poi allargarsi anche a quelli solidi, come il cancro della mammella o della prostata. Grazie al primo *round* di finanziamento, con cui sono stati raccolti dieci milioni di euro, Genenta è riuscita a produrre tutti i dati necessari per iniziare la sperimentazione clinica, sui pazienti.

Alleanze strategiche

Tuttavia per arrivare a questa fase dello sviluppo una piccola start-up ha bisogno di stringere alleanze. Come quella con MolMed, altra realtà biotech milanese, che produrrà per Naldini e colleghi il necessario per la realizzazione del primo studio sul mieloma multiplo. «Nella prima metà del 2018 partirà uno studio di fase 1-2, che valuterà la sicurezza e l'efficacia dell'azione locale dell'interferone», spiega ancora Paracchi. «Si parte al San Raffaele, dove l'esperienza nella terapia genica è ormai decennale, ma verranno coinvolti altri centri».

Per entrare nella fase più avanzata di sviluppo, lo *spin-out* milanese ha cercato partnership industriali importanti, come quella con Amgen, la più grande biotech al mondo: con loro, i ricercatori italiani porteranno avanti una serie di studi per aumentare il numero di tumori da aggredire con l'immunoterapia genica. «La nostra è una piattaforma e la terapia genica ex-vivo può essere pensata anche in combinazione con altri approcci immunoterapici, come quello che coinvolge i checkpoint», va avanti l'amministratore delegato. Si tratta dei farmaci immunologici più famosi, gli unici finora a essere entrati nella pratica clinica. La quarta via è ormai tracciata e la terapia di Genenta, da sola o in combinazione, promette di essere uno strumento importante per risvegliare il sistema di autodifesa dell'organismo e convincerlo a combattere contro il cancro.

di Telmo Pievani
è professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche dell'Università degli Studi di Padova

Uova per tutti i gusti

Uno studio ha analizzato le basi della diversità morfologica osservata nelle uova

La copertina di «Science» di inizio estate raffigurava una distesa di uova variopinte. Non era un omaggio pasquale fuori stagione. La festosa immagine trasmetteva di primo acchito un messaggio di diversità: uova di varie dimensioni e forme, tondeggianti, oblunghe, asimmetriche, ellittiche, coniche. Uova per tutti i gusti. Dunque ciascuno perfetto a modo suo? Non proprio.

Nel racconto dell'evoluzione ci si fa prendere spesso dall'entusiasmo dipingendo i meravigliosi adattamenti delle specie come se fossero opere di suprema e impeccabile ingegneria. Talvolta lo sono, ma non di norma, e per alcune precise ragioni. Charles Darwin scrisse a più riprese che l'evoluzione non ambisce alla perfezione, ma fa quello che può con il materiale a disposizione. Il processo selettivo non agisce su singoli tratti isolati, come se gli organismi fossero una collezione di atomi funzionali, ma su un complesso di variazioni correlate. Quindi è normale che un adattamento in una parte possa avere, per esempio, effetti collaterali (pur tollerabili) su un'altra.

In sostanza, la selezione naturale è un meccanismo che agisce in un contesto di vincoli: fisici, come la gravità o il rapporto volume-superficie per la dispersione del calore; meccanici; di sviluppo; funzionali. Per questo non esistono insetti grandi come elefanti, né animali che si spostano su due o quattro ruote incardinate su assi. Il gioco evolutivo è tutto un compromesso, anche tra pressioni selettive antagoniste l'una dell'altra, come la selezione naturale e la selezione sessuale. Nel caso dell'uovo, un'invenzione formidabile dei primi vertebrati adattatisi alla terraferma 360 milioni di anni fa (ovvero, racchiudere l'embrione dentro un ambiente protetto durante lo sviluppo) si è diversificato poi in una gamma di forme che devono fare i conti con alcuni vincoli, soprattutto negli uccelli.

Il gruppo internazionale di evoluzionisti ed esperti di biomeccanica che si è guadagnato la copertina di «Science» ha voluto mettere alla prova proprio l'idea che l'esuberante diversità nella morfologia delle uova di uccello fosse dovuta a precipui adattamenti alla dieta, all'habitat e al sito di nidificazione di ciascuna specie. Uova asimmetriche e coniche per chi nidifica sulle scogliere, così non rotolano via. Robuste uova sferiche invece per chi deve ottimizzare la quantità di calcio per fare il guscio o la distribuzione dei pori per gli scambi gassosi. E così via, in un mondo ideale dove tutto serve esattamente a qualcosa.

Studiando le forme di 50.000 uova di 1400 specie diverse e incrociandole con i parametri ecologici e con le relazioni filogenetiche, i ricercatori di Princeton, Harvard e altre università hanno scoperto che queste ipotesi adattative sono solo parzialmente corrette. L'analisi macroevolutiva su larga scala mostra come gran parte delle asimmetrie e delle ellitticità che si notano nelle uova degli uccelli siano in realtà dovute a limitazioni meccaniche. In particolare gli adattamenti al volo hanno prodotto, nella struttura corporea dei dinosauri teropodi e degli uccelli, riorganizzazioni anatomiche così profonde da influenzare anche la forma delle uova, perché in base al tipo di volo differiscono le pressioni esercitate sulla membrana interna dell'uovo nel suo passaggio lungo l'ovidotto.

Collezione di forme. In questa collezione storica dell'Istituto di biologia e zoologia della Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg si può notare la diversità delle uova.

Schellhorn/ullstein bild via Getty Images

La morfometria ci dice che i grandi volatori hanno schiacciato e allungato le loro uova ellittiche dentro un'anatomia aerodinamica tutta protesa a sprigionare la potenza delle ali. Ma il pulcino deve pur avere uno spazio per crescere, da qui una serie di compromessi, non sempre ottimali eppur di successo. Per chi invece si affida più spesso al volo planato, o addirittura ha smesso di volare, le uova possono anche rimanere più tondeggianti. Dunque la bella forma funzionale delle uova si è evoluta in un contesto di vincoli strutturali. Adesso lo sappiamo: a guardar bene, nessun uovo è perfetto.

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Molecole contro il dolore

Piccoli RNA attivi nel sistema nervoso possono avere un effetto analgesico

Ho parlato altre volte dei microRNA (miRNA), piccolissimi RNA (lunghi 20-22 nucleotidi appena) che sembrano fare sempre più cose all'interno delle nostre cellule, dalla regolazione della trascrizione del DNA al controllo della traduzione dei corrispondenti RNA messaggeri. Se si pensa che la loro esistenza era sconosciuta fino a pochi anni fa, si può comprendere con quale fervore questi RNA siano studiati nei laboratori di tutto il mondo. L'ultima novità viene dalla implicazione di un gruppo di loro (denominati miR-183) nella regolazione della soglia del dolore, sia acuto che persistente o, meglio, sia fisiologico che patogeno (si veda Peng C. e collaboratori, in «Science», Vol. 356, pp. 1168-1171).

Può essere fisiologico un dolore? Certo. È quello che usualmente ci avvisa di un problema reale e che ci mette in guardia contro qualcosa. Questo meccanismo è utile, se non essenziale, per la nostra sopravvivenza, sostanzialmente «consigliandoci» di non fare certe cose, tipo pungerci o bruciarci, o anche «sforzare» troppo una parte del corpo già traumatizzata. La funzione della sensazione del dolore è, anzi, così importante, che a questa sensazione è dedicato un circuito nervoso speciale che va dai recettori periferici alla corteccia cerebrale, traversando tutto il corpo. I recettori periferici inviano il segnale ai gangli della radice dorsale (DRG, *dorsal root ganglia*) del midollo spinale e da lì questo viene ri-inviato alla corteccia. A loro volta i recettori periferici possono essere di almeno due tipi; i meccanocettori che avvertono la pressione sulla parte del corpo alla quale appartengono – per esempio i polpastrelli delle dita di una mano – e i nocicettori, sensibili alla temperatura e a stimoli dolorosi di natura fisica o chimica. I segnali nervosi inviati da questo tipo di recettori percorrono apposite fibre nervose, che possono essere lente come le cosiddette fibre C, o veloci e velocissime come le fibre Aδ e Aβ, rispettivamente.

Caso anomalo. Il dolore può essere fisiologico, cioè essenziale per la sopravvivenza, o anomalo, per esempio dovuto a una lesione.

Syda Productions/Shutterstock

C'è però anche un dolore anomalo o patologico, derivante da una lesione a carico di un tessuto, o delle terminazioni nervose stesse, e quindi prodotto direttamente dal corpo senza una causa apparente. Si parla in questo caso di dolore patogeno o anche neuropatico. Qui il dolore più che denunciare una malattia, rappresenta esso stesso la malattia. È la manifestazione patologica di cui ci dobbiamo liberare.

Da persona a persona esiste una lieve differenza fra la soglia dello stimolo dolorifico. Molti sono i rimedi naturali o artificiali messi a punto per ridurre questo stimolo, particolarmente insopportabile nelle fasi terminali di molte patologie. Ci sono molti modi diversi di contrastare formazione o comunicazione del dolore e iniziamo a conoscerne e a sfruttarne alcuni. È stata una lezione capitale e un trionfo della scienza medica che ha pochi uguali. Sembra molto promettente quindi il fatto che si sia oggi individuato un altro possibile strumento di controllo del dolore, di natura francamente imprevista e inusitata.

Il gruppo dei miR-183 è attivo nel sistema nervoso e in particolare nei gangli DRG e la loro quantità è ridotta in modelli animali di dolore neuropatico. I nostri autori hanno allora prodotto una linea di topi mancanti dei geni codificanti per i miR-183 e l'hanno incrociata in vari modi, in modo da variare così a piacimento la quantità di prodotti miR-183 disponibili in un dato individuo e nei suoi diversi tessuti. La risposta generale è chiara: i microRNA di questo gruppo innalzano la soglia del dolore in questi modelli animali (topi) sia per il dolore normale sia per quello neuropatico. Un'analisi più particolareggiata del fenomeno mostra un effetto diretto sui canali del calcio delle famiglie CACNA2D, già noti per essere implicati nel controllo del dolore e essere bersagli dell'azione del gabapentin, un potente analgesico.

La cosa interessante è che molti di questi risultati sono replicabili anche sugli esseri umani, studiati ovviamente con metodi molto diversi. È anche istruttivo notare che la stimolazione dei meccanocettori non ha nessun effetto su individui sani, ma peggiora sensibilmente la situazione nel caso di dolore neuropatico. I geni miR-183 si prestano bene a generare variazioni di numero in individui diversi e questo potrebbe spiegare anche le differenze tra individui riguardo alla soglia del dolore.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

La signora della matematica

Scomparsa a 40 anni la prima donna vincitrice di una medaglia Fields

Maryam Mirzakhani, la prima e (finora) unica donna a vincere una medaglia Fields per la matematica, è morta di cancro al seno il 14 luglio scorso, a soli quarant'anni. Era nata il 3 maggio 1977 a Teheran, e fin da ragazza aveva rivelato doti eccezionali. Per esempio, frequentando le medie e le superiori alla scuola Farzanegan, un'istituzione distribuita sull'intero territorio iraniano e appositamente creata «per lo sviluppo dei talenti eccezionali». E vincendo per due volte la medaglia d'oro alle Olimpiadi della Matematica, nel 1994 e 1995, realizzando la seconda volta un punteggio pieno di 42/42.

Benché un *enfant prodige* spesso smetta di essere un *prodige* quando cessa di essere un *enfant*, e in genere rientri tristemente nei ranghi degli adulti, a volte riesce a superare la condizione di *Ex prodigio* (1953) e a svilupparsi intellettualmente, fino a poter dichiarare *Sono un matematico* (1956), come nei titoli dei due volumi dell'autobiografia di Norbert Wiener. In particolare, una dozzina di vincitori delle Olimpiadi della Matematica sono arrivati fino alla medaglia Fields, e la cosa è riuscita anche alla Mirzakhani nel 2014.

La fama l'aveva però raggiunta già dieci anni prima, nel 2004, con la sua tesi di dottorato: a Harvard, dov'era approdata dopo la laurea a Teheran nel 1999, e con Curtis McMullen, lui stesso medaglia Fields nel 1998. Il risultato che l'ha resa famosa è stato un calcolo nello stile dei grandi teoremi: per esempio, quello di Jacques Hadamard e Charles Jean de la Vallée Poussin, che nel 1896 dimostrarono che la distribuzione dei numeri primi è logaritmica, nel senso che il rapporto fra il numero n e il numero dei primi minori di n tende al logaritmo naturale di n.

Maryam Mirzakhani era diventata famosa già nel 2004, grazie alla sua tesi di dottorato.

Anche in geometria si erano fatti calcoli simili. In particolare, considerando superfici chiuse come la sfera o le ciambelle con uno o più buchi, e le linee di lunghezza minima, o «geodetiche», su di esse: per esempio, i meridiani sulla sfera. Nel caso delle ciambelle con buchi, le geodetiche chiuse erano risultate crescere in maniera esponenziale, nel senso che il prodotto fra il numero n e il numero di geodetiche chiuse di lunghezza minore di n tende all'esponenziale naturale di n.

Tra le geodetiche chiuse, alcune passano più di una volta in uno stesso punto, autointersecandosi, e altre no. Nella sua tesi Mirzakhani ha dimostrato che queste ultime, dette «semplici», sono relativamente poche: il loro numero, infatti, non cresce esponenzialmente rispetto alla lunghezza, ma solo polinomialmente. E il grado del polinomio in n è legato al numero di buchi della ciambella, in una maniera già intuita da Riemann: cioè, sei volte il numero dei buchi meno uno.

Una delle applicazioni di questo risultato è stata una nuova e naturale dimostrazione di una congettura di Edward Witten, medaglia Fields nel 1990, legata alle intersezioni delle geodetiche su particolari superfici da lui considerate nella teoria delle stringhe. Una congettura profonda, di dimostrazione difficile, la cui soluzione nel 1992 da parte di Maxim Kontsevich aveva contribuito a far vincere pure a lui la medaglia Fields nel 1998.

Nel 2006, due anni dopo la sua tesi, la Mirzakhani ha iniziato una collaborazione con Alex Eskin, che è sfociata nel 2014 in un monumentale lavoro di quasi 200 pagine sulle traiettorie seguite dalle palle da biliardo che rimbalzano sui bordi di tavoli poligonali con angoli razionali. La cosa può sembrare ludica, ma è in realtà un tipico esempio di un sistema dinamico che può facilmente portare a comportamenti caotici. E la tipica domanda che ci si pone su un simile biliardo è se esistono traiettorie che passino su tutti i punti del tavolo.

Un modo per legare queste problematiche alla geometria consiste nel porre degli specchi ai lati del tavolo, in modo da trasformare il percorso a zig-zag della pallina che rimbalza sui bordi di un unico tavolo in un percorso rettilineo su una successione di tavoli riflessi osservati negli specchi. Incollando fra loro i bordi estremi dei tavoli di queste successioni si ottengono superfici analoghe alle ciambelle, su cui le palline si muovono seguendo geodetiche. E una tipica applicazione di questi studi riguarda la possibilità di illuminare ogni punto di una stanza con le pareti a specchio mediante un'unica lampadina piazzata nel punto giusto.

Ricerche di questo genere esemplificano un motto di Maryam Mirzakhani: «Non bisogna limitarsi a cogliere i frutti di una pianta dai rami a portata di mano», perché «non è detto che la vita debba essere facile». Come dimostrano sia i suoi spettacolari lavori, sia la sua triste e prematura morte.

di Amedeo Balbi
Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

La visione di Musk

L'imprenditore vuole portare le specie umana fuori della Terra in modo definitivo

A settembre dello scorso anno, l'imprenditore Elon Musk – cofondatore di PayPal, ma ormai noto soprattutto come creatore e leader di SpaceX, una delle più importanti aziende private del settore aerospaziale – ha presentato al 66° Congresso internazionale astronautico i suoi piani per stabilire una colonia permanente su Marte nei prossimi decenni. L'intervento, come sempre accade quando c'è di mezzo Musk, ha suscitato grande attenzione e curiosità, e altrettanto grandi interrogativi, il più frequente dei quali è: ma Elon Musk fa sul serio?

Al momento, l'unico modo per provare a rispondere è andarsi a leggere la versione scritta della presentazione di Musk, pubblicata a giugno sulla rivista «New Space» con il titolo *Making Humans a Multi-Planetary Species*. Già, perché l'ambizione di Musk non è semplicemente fondare una colonia autosufficiente su Marte, ma addirittura portare definitivamente la nostra specie fuori dalla Terra. Ma come si fa a convincere un milione di persone a stabilirsi in un ambiente tremendamente ostile come quello del Pianeta Rosso, come immagina Musk? Il problema non è la voglia, visto che gli spiriti avventurosi non mancano: sono i soldi. Ai prezzi attuali, un biglietto di sola andata per Marte costerebbe circa dieci miliardi di dollari.

Musk pensa di riuscire a portarlo attorno ai 200.000 dollari, più o meno il prezzo di un appartamento. Come? Riutilizzando le navi spaziali (pensiamo a quanto costerebbe un biglietto aereo se ogni veicolo fosse usato una volta sola) e usando il propellente giusto, ovvero uno che si possa rifornire in orbita e produrre su Marte. La scelta ideale, secondo lo studio del gruppo di Musk, sarebbe basata sul metano (che si può produrre dall'anidride carbonica e dall'acqua presenti su Marte). Le navi spaziali (in fibra di carbonio, poco più grandi del gigantesco Saturn V usato dalla NASA per le missioni Apollo, però con una capacità molto maggiore) verrebbero caricate in orbita e partirebbero circa ogni due anni, nel periodo di minima distanza tra Marte e la Terra. Ogni nave trasporterebbe circa 100 passeggeri alla volta, il che richiederebbe circa 10.000 viaggi per arrivare all'obiettivo di un milione di coloni. Ogni viaggio durerebbe tra gli 80 e i 150 giorni a seconda del periodo di lancio (tuttavia Musk prevede che si potrebbe scendere fino a soli 30 giorni nel lontano futuro). Secondo le stime dell'imprenditore, dunque, ci vorrebbe una flotta composta da 1000 navi e un tempo complessivo di circa un secolo per raggiungere l'obiettivo che ha fissato.

Bene, ma chi paga? Musk pensa di finanziare l'impresa con i voli commerciali di SpaceX (mettendo in orbita satelliti e trasportando carico da e per la Stazione spaziale internazionale). E anzi, dichiara apertamente che l'unica ragione per cui sta accumulando un patrimonio personale è per realizzare il suo sogno di rendere multiplanetaria la specie umana.

E dunque, Elon Musk fa sul serio? Io comincio a credere di sì. E non perché il suo piano sia di effettiva e immediata realizzazione pratica. Balza agli occhi l'assenza di dettagli tecnici cruciali, primo fra tutti la protezione dalle radiazioni spaziali durante il viaggio e poi sul suolo di Marte, che sarebbero probabilmente letali per i coloni. E sono certo che Musk stesso sia perfettamente consapevole delle enormi difficoltà dell'impresa, e che difficilmente riuscirà a iniziarla nei prossimi dieci anni, come invece dichiara. Tuttavia sa anche che ogni grande impresa comincia da una visione, ed è in questo senso che credo faccia sul serio. D'altra parte, nel 2002 SpaceX non esisteva, e ora firma contratti con la NASA e fa atterrare razzi in verticale.

Insomma, probabilmente nessuno più di Elon Musk ha oggi i mezzi per convincere l'umanità che si possa andare su Marte e restarci. Se poi ci andremo davvero, per ora nessuno – neanche lui – può dirlo.

Terreno di conquista. Il cratere Bonneville su Marte fotografato da Spirit, un rover della NASA. Elon Musk vuole fondare una colonia umana autosufficiente sul Pianeta Rosso.

Cortesia NASA

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

DNA antico senza fossili

Una tecnica permette di estrarre materiale genetico umano da sedimenti geologici

Questo davvero non me lo aspettavo! I paleogenetisti ci hanno sorpreso ancora una volta e hanno reso un bel servizio a tutti coloro che si occupano di evoluzione umana. Hanno sviluppato un nuovo metodo per recuperare DNA antico dai sedimenti delle grotte, anche in assenza di resti scheletrici.

Ci sono una gran quantità di siti preistorici che hanno restituito manufatti del Paleolitico di varia antichità. Sono la testimonianza dell'insediamento o del passaggio di gruppi umani agli albori della nostra specie e di altre specie umane estinte. I resti scheletrici (quando vengono scoperti) aggiungono molto: forniscono l'identità delle creature che hanno frequentato quel determinato sito. Purtroppo, però, i fossili umani sono cosa assai rara. La nuova possibilità di estrarre DNA direttamente dai sedimenti geologici può farci ora scoprire – anche in assenza di ossa e/o denti – chi frequentava un determinato sito, espandendo parecchio il campo delle possibili comparazioni paleogenetiche.

Vediamo com'è andata. Un gruppo di ricercatori del «solito» Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia, coordinato da Matthias Meyer e dal «solito» Svante Pääbo, aveva deciso di indagare se il DNA contenuto nei resti scheletrici di animali e uomini vissuti nel Pleistocene possa sopravvivere e, dunque, possa essere recuperato nei sedimenti di siti dove le testimonianze archeologiche indicano una qualche frequentazione di decine o anche centinaia di migliaia di anni prima. Con questa speranza – un po' ottimistica, a prima vista – il gruppo di paleogenetisti ha quindi collaborato con un vero e proprio network di paleontologi e archeologi del Paleolitico che da tempo scavano in siti archeologici: in Belgio, Croazia, Francia, Russia e Spagna.

Hanno così raccolto una quantità di campioni di sedimenti che, nel loro insieme, coprono un intervallo di tempo compreso fra oltre 550.000 e circa 14.000 anni dal presente. Usando piccole quantità di materiale, i ricercatori hanno quindi recuperato e potuto analizzare frammenti di DNA mitocondriale (mtDNA), quello contenuto nei mitocondri, noti organuli cellulari, e li hanno quindi identificati sulla base delle banche dati a loro disposizione. Niente DNA umano, però. È invece risultata la presenza di mtDNA appartenente a diversi gruppi di mammiferi; a 12 famiglie differenti, per la precisione, che includono specie estinte come mammut e rinoceronti lanosi, orsi della caverne e iene maculate.

Sarebbe già stato un risultato notevole, ma il colpo più grosso è venuto quando i dati molecolari estratti dai sedimenti hanno finalmente mostrato la presenza di mtDNA umano. In un primo momento, i ricercatori avevano iniziato a temere che la quantità di DNA di altri mammiferi fosse troppo abbondante per individuare piccole tracce di quello umano. Hanno tuttavia puntato in modo specifico a segmenti di DNA di origine umana. E la tenacia ha dato loro ragione. Nove campioni provenienti da quattro dei siti archeologici esaminati contenevano quantità di DNA umano antico sufficienti per ulteriori analisi. E questi sono i risultati finali: otto campioni hanno restituito mtDNA di Neanderthal e un altro mtDNA di tipo «denisoviano». La maggior parte di questi campioni provengono da siti o da singoli strati per i quali è archeologicamente nota la frequentazione umana, ma nei quali nessun osso o dente umano era mai stato trovato.

Lo stesso Pääbo ha così commentato questo formidabile risultato: «Ricavando il DNA dai sedimenti, possiamo individuare la presenza di gruppi umani nei siti e nelle aree in cui questo dato non può essere ottenuto con altri metodi; pertanto, l'analisi dei DNA incluso nei sedimenti è una procedura molto utile e può diventare routine per l'archeologia e la paleontologia».

Casa neanderthaliana. La grotta di El Sidrón, nelle Asturie, comunità autonoma della Spagna settentrionale, dove è stata documentata la presenza di Neanderthal.

Cortesia Joan Costa/CSIC

CLIMA

Calore mortale

Il rischio di morti causate dalle ondate di caldo estremo continua ad aumentare

Stefano Carofei/Agf

Quasi un terzo della popolazione mondiale oggi sperimenta per almeno 20 giorni all'anno condizioni di rischio di decessi legati agli effetti diretti delle ondate di calore, ma nel 2100 la percentuale sarà tra il 48 e il 74 per cento, a seconda di quanto aumenteranno le temperature.

I danni del cambiamento climatico sono tangibili già oggi, sebbene quelli in atto siano solo i primi, tenui segni di quello che ci attende. La cosa vale anche per la mortalità diretta da ondate di calore, come attestano due nuovi studi.

Su «Science Advances» Amir AghaKouchak, della Università della California a Irvine, insieme colleghi dell'Indian Institute of Technology Bomba ha indagato sul paese asiatico. Analizzando i dati del Servizio meteorologico dell'India dal 1960 al 2009, AghaKouchak mostra che in questo mezzo secolo le temperature medie estive sono cresciute di oltre 0,5°C, portando a ondate di calore estremo più frequenti, durature e intense.

Un modello costruito dal gruppo mostra che questo mezzo grado in più ha aumentato di quasi 2,5 volte la probabilità di eventi mortali di massa (con oltre 100 vittime). Così nel 2010 sono morte 1300 persone, nel 2013 circa 1500 e nel 2015 oltre 2400. Col riscaldamento ben più marcato previsto per i prossimi decenni si prospettano quindi «costi umani ingenti» già solo per gli effetti diretti delle temperature, a prescindere da siccità, alluvioni e altri danni. E non solo in India.

Lo studio evidenzia infatti una vulnerabilità generale dei paesi alle basse latitudini, dove, sebbene il termometro salirà meno che altrove, il clima già caldo e umido e la fragilità sociale causeranno molte più vittime, soprattutto fra le fasce più povere.

Camilo Mora, dell'Università delle Hawaii a Manoa, lo conferma su «Nature Climate Change» con un'analisi globale. «Delle ondate di calore mortali si parla in casi drammatici come quello europeo del 2003, con 70.000 vittime stimate. Ma mancava una valutazione complessiva dei decessi e dei rischi, perché le raccolte di dati sono sporadiche e inconsistenti», spiega il ricercatore. Per questo motivo Mora ha esaminato sistematicamente la letteratura, raccogliendo studi su quasi 2000 eventi, per calcolare quando le combinazioni di temperatura e umidità superino le capacità di termoregolazione corporea, mettendo a rischio le persone più vulnerabili per condizione fisica o sociale, e quanto spesso si verifichino queste condizioni nel mondo.

È emerso che, sebbene facciano notizia solo i casi estremi, in realtà le situazioni a rischio sono frequenti e diffuse. Con un'umidità elevata, anche 30°C possono essere pericolosi, e quasi un terzo della popolazione mondiale sperimenta già condizioni a rischio per almeno 20 giorni all'anno. Nel 2100 la quota sarà tra il 48 e il 74 per cento, a seconda del clima che verrà, con conseguenze esacerbate dall'urbanizzazione e dall'invecchiamento demografico.

«I danni ormai sono pressoché inevitabili, e per ridurli bisogna agire su ambo i fronti: frenare con forza le emissioni e aiutare i più vulnerabili ad adattarsi», concludono gli studiosi.

Giovanni Sabato

ASTROFISICA

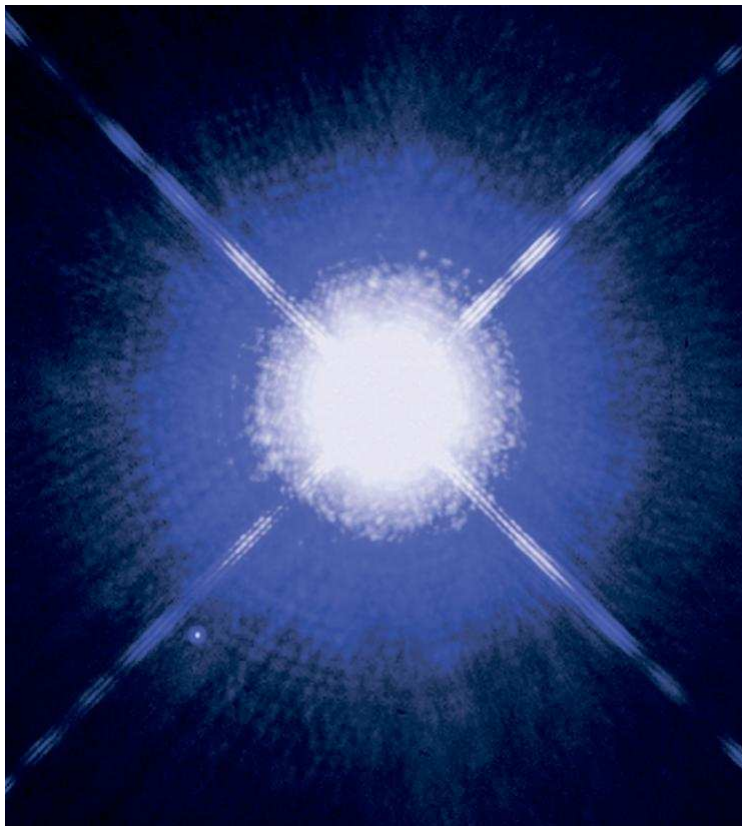
Pesare le stelle con la relatività generale

La deflessione gravitazionale della luce è stata usata per misurare la massa di una nana bianca

La prima prova sperimentale della teoria della relatività generale, pubblicata nel 1915, arrivò nel 1919, quando una spedizione guidata dall'astronomo britannico Arthur Eddington osservò la deflessione della luce durante un'eclissi totale di Sole. Come previsto dalla teoria, quando la luce passa in prossimità di una corpo massiccio, la sua traiettoria viene deflessa e l'entità di questa deviazione dipende proprio dalla massa del corpo, che appunto si comporta da lente gravitazionale.

Adesso, un gruppo di astronomi guidato da Kailash Sahu, dello Space Telescope Institute di Baltimora, negli Stati Uniti, ha impiegato per la prima volta la stessa tecnica per misurare la massa di una stella. In particolare, Sahu e colleghi hanno sfruttato il passaggio della nana bianca Stein 2051 B, distante 16 anni luce da noi, quasi davanti a una stella di sfondo, distante oltre 5000 anni luce, per osservare a più riprese con il telescopio spaziale Hubble i cambiamenti di posizione di quest'ultima causati dalla deflessione gravitazionale, un effetto noto come microlensing astrometrico.

In questo modo le misure dei gradi di deflessione hanno permesso di calcolare la massa della nana bianca, che è risultata pari a 0,675 masse solari, con una precisione attorno all'8 per cento. Il risultato, pubblicato su «Science», conferma la conoscenza della fisica delle nane bianche.

Emiliano Ricci

Correlazione quantistica da record… via satellite

Un gruppo di fisici cinesi guidati da Juan Yin, dell'University of Science and Technology of China, a Hefei, è riuscito a mantenere due fotoni in correlazione quantistica fino a una distanza di 1200 chilometri. Per ottenere questo risultato, descritto su «Science», Yin e collaboratori hanno impiegato il satellite Micius, lanciato il 17 agosto 2016 nell'ambito del progetto internazionale Quantum Experiments at Space Scale (QUESS), volto proprio allo studio di esperimenti di ottica quantistica su lunga distanza.

Alla base del fenomeno del teletrasporto quantistico, la correlazione quantistica – o *entanglement*, letteralmente intreccio – consiste proprio nell'«intreccio», quantisticamente inestricabile, di due o più particelle (non necessariamente fotoni, ma anche elettroni, o atomi) opportunamente preparate, i cui stati non possono più essere descritti singolarmente: in pratica, due particelle *entangled* si comportano come se fossero un tutt'uno, anche se si trovano molto distanti l'una dall'altra. Così, una misurazione effettuata su una delle due influenza istantaneamente l'altra, ovunque si trovi, in quella che Albert Einstein definì criticamente «azione spettrale a distanza».

Fino a oggi, gli esperimenti di correlazione quantistica svolti sulla Terra erano arrivati fino a distanze di un centinaio di chilometri. I problemi connessi alla disponibilità di una linea di vista sufficientemente lunga e alla presenza di un mezzo di propagazione – aria o fibra ottica – capace di portare i fotoni alla decoerenza, ovvero alla perdita della correlazione quantistica, rendono molto complessi questi esperimenti. L'impiego di un satellite, quindi di tecnologie spaziali, capace di trasmettere fotoni entangled a più stazioni riceventi distribuite sul territorio cinese ha invece permesso a Yin e colleghi di superare queste limitazioni, raggiungendo nel trasporto di fotoni correlati un'efficienza assai più grande rispetto a quella possibile con le attuali fibre ottiche e dimostrando la possibilità di una futura rete globale di comunicazioni quantistiche.

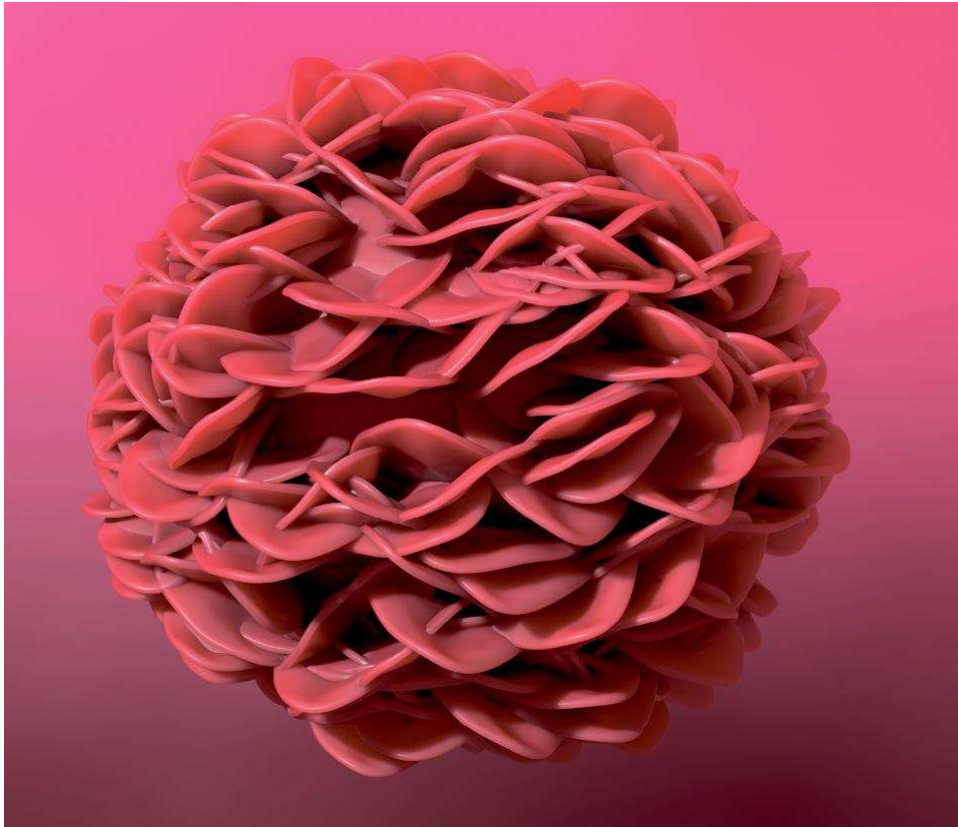
Emiliano Ricci

NASA/ESA/H. Bond (STScI) e M. Barstow, Università di Leicester (*nana bianca*); R. Kail/Science Photo Library/AGF (*fotone*)

BIOLOGIA DELLO SVILUPPO

L’attività inattesa dell’immunità fetale

Il sistema immunitario appare già maturo nel secondo trimestre di gravidanza

luismmolinali/iStock (*cellula dendritica*)

Quando il sistema immunitario di un feto incontra un agente estraneo, trovare il giusto equilibrio fra tolleranza e attacco è ancora più complicato che per un adulto: deve rispondere agli antigeni che lo raggiungono, anche per prepararsi a controbattere ai patogeni che incontrerà dopo la nascita, evitando però di attaccare – oltre ai propri – anche i tessuti materni, in parte estranei.

Gran parte della soluzione pareva essere semplicemente nella scarsa attività immunitaria fetale per gran parte della gravidanza. Ma analizzando un centinaio di feti umani abortiti nel secondo trimestre, Florent Ginhoux, dell’Agency for Science, Technology and Research di Singapore, ha dimostrato che, come si legge in un articolo pubblicato su «Nature», le cose sono più complicate.

Il sistema immunitario a quell’età appare già maturo. Il feto produce un’ampia gamma di cellule immunitarie, e le cellule dendritiche – che intercettano gli antigeni e li presentano ai linfociti T per innescare l’attacco – sono già attive. Solo che tendenzialmente fanno l’opposto: attivano molto più del solito un’altra classe di linfociti T, quelli regolatori, che smorzano la risposta immunitaria. Inoltre inibiscono la produzione, da parte dei linfociti, di un messaggero (il TNF alfa) che promuove l’infiammazione e la risposta immunitaria.

Questo potente meccanismo agisce in concerto con altri già noti orientando la risposta immunitaria, che pure è già in piena funzione, molto più verso la tolleranza che verso l’attacco. Il che spiega quindi la nota tolleranza che si instaura nel feto verso gli antigeni materni. Alcuni antigeni tipici dei patogeni, viceversa, inducono una risposta aggressiva, con meccanismi che restano da chiarire.

Questi fenomeni potranno avere rilevanza pratica in vari ambiti. Un elevato TNF alfa gioca un ruolo in alcuni aborti spontanei, nel diabete gravidico e nell’enterocolite necrotizzante, una reazione immunitaria incontrollata che colpisce alcuni prematuri; la scoperta della via biochimica che lo inibisce potrebbe quindi portare a nuove cure.

Giovanni Sabato

Biopsie liquide per diagnosi precoci

Per effettuare diagnosi precoci, la ricerca oncologica punta tutto sulle cosiddette biopsie liquide: poiché le cellule tumorali rilasciano frammenti di DNA nel sangue, con un prelievo si potrebbe «pescare» il genoma cancerogeno in circolo prima che il tumore raggiunga uno stadio troppo avanzato. Facile a dirsi, difficile a farsi. È complicato trovare pezzi di DNA tumorale nel sangue quando la malattia è all’inizio. Ma è possibile, come dimostra uno studio pubblicato sul «Journal of Clinical Oncology» da Pedram Razavi dello statunitense Memorial Sloan Kettering Cancer Center e colleghi, in collaborazione con Grail, azienda californiana specializzata nel sequenziamento del DNA. I ricercatori hanno prima individuato mutazioni in 508 geni espressi nei tessuti cancerogeni di 124 pazienti; poi hanno analizzato il DNA liberato nel flusso sanguigno scoprendo che nell’89 per cento dei soggetti almeno una delle mutazioni rilevate nei tessuti era presente anche nel sangue. Per realizzare il potenziale diagnostico delle biopsie liquide bisognerà agire su due fronti: migliorare le tecniche di sequenziamento del DNA e costruire una «libreria» delle mutazioni espresse nelle prime fasi di un tumore da consultare quando si cerca DNA mutato nel sangue.

Martina Saporiti

Pubblicazione a norma della Legge 5 Agosto 1981 n. 416 e successive modificazioni

A. MANZONI & C. S.p.A.

Sede Legale Via Nervesa, 21 - 20139 Milano

Capitale Sociale Euro 15.000.000,00 i.v. - Socio Unico - Partita Iva/Codice Fiscale/Iscrizione nel Registro delle Imprese di Milano n° 04705810150
REA di Milano n° 1031852 Direzione e Coordinamento Gedi Gruppo Editoriale S.p.A.

BILANCIO REDATTO IN BASE AI PRINCIPI CONTABILI INTERNAZIONALI IAS/IFRS AI SENSI DEL D.LGS. 38 DEL 28 FEBBRAIO 2005

SITUAZIONE PATRIMONIALE - FINANZIARIA

ATTIVO (euro)	31 dicembre 2015	31 dicembre 2016
Attività immateriali a vita indefinita	-	-
Altre immobilizzazioni immateriali	-	-
Immobilizzazioni immateriali	-	-
Immobilizzazioni materiali	774.827	723.176
Altre partecipazioni	50.000	50.000
Crediti non correnti	207.308	96.060
Attività per imposte anticipate	2.956.525	2.632.843
ATTIVITÀ NON CORRENTI	**3.988.660**	**3.502.079**
Rimanenze	-	-
Crediti commerciali	177.039.817	155.009.378
Titoli e altre attività finanziarie	551.919	222.299
Crediti tributari	1.975.299	1.604.922
Altri crediti	2.062.572	2.595.861
Disponibilità liquide	11.582.176	3.301.998
ATTIVITÀ CORRENTI	**193.211.783**	**162.734.458**
TOTALE ATTIVO	**197.200.443**	**166.236.537**

PASSIVO (euro)	31 dicembre 2015	31 dicembre 2016
Capitale sociale	15.000.000	15.000.000
Riserve	8.832.878	6.342.930
Utili (perdite) a nuovo	(8.070.198)	(8.157.718)
Utile (perdita) d'esercizio	(3.989.948)	(723.756)
PATRIMONIO NETTO	**11.772.732**	**12.461.456**
Debiti finanziari	-	-
Fondi per rischi ed oneri	1.276.999	1.270.999
TFR e altri fondi per il personale	3.270.089	3.141.758
Passività per imposte differite	77.319	20.293
PASSIVITÀ NON CORRENTI	**4.624.407**	**4.433.050**
Debiti finanziari	55.689.451	32.961.670
Fondi per rischi ed oneri	3.601.226	2.811.526
Debiti commerciali	116.463.251	107.370.956
Debiti tributari	1.145.263	1.804.582
Altri debiti	3.904.113	4.393.297
PASSIVITÀ CORRENTI	**180.803.304**	**149.342.031**
TOTALE PASSIVITÀ	**185.427.711**	**153.775.081**
TOTALE PASSIVITÀ E PATRIMONIO NETTO	**197.200.443**	**166.236.537**

CONTO ECONOMICO COMPLESSIVO

(euro)	Anno 2015	Anno 2016
Ricavi	347.020.213	341.576.963
Altri proventi operativi	1.174.520	362.253
Costi per acquisti	(109.882)	(101.896)
Costi per servizi	(326.328.826)	(319.245.927)
Costi per il personale	(23.437.441)	(20.190.641)
Altri oneri operativi	(2.464.320)	(1.850.271)
Ammortamenti e svalutazioni	(84.513)	(86.000)
Risultato operativo	**(4.230.249)**	**464.481**
Proventi/(Oneri) finanziari netti	(887.045)	(1.288.607)
Risultato ante imposte	**(5.117.294)**	**(824.126)**
Imposte	1.127.346	100.370
RISULTATO NETTO	**(3.989.948)**	**(723.756)**
Altre componenti del conto economico complessivo	**154.373**	**(87.520)**
TOTALE CONTO ECONOMICO COMPLESSIVO	**(3.835.575)**	**(811.276)**

ELENCO DELLE TESTATE STAMPA IN ESCLUSIVA ALLA DATA DELLA PRESENTE PUBBLICAZIONE

Editore	Testata	Editore	Testata
GEDI Gruppo Editoriale SpA	AFFARI & FINANZA	Finegil Editoriale SpA	IL MATTINO DI PADOVA
	D LA REPUBBLICA		IL MATTINO DI PADOVA-AFFARI IMMOBILIARI
	DELLE DONNE		LA TRIBUNA DI TREVISO
	IL VENERDÌ DI REPUBBLICA		LA NUOVA VENEZIA E MESTRE
	LA REPUBBLICA TUTTO MILANO		IL TIRRENO
	LA REPUBBLICA TROVA ROMA		GAZZETTA DI MANTOVA
	NATIONAL GEOGRAPHIC ITALIANO		NUOVA GAZZETTA DI MODENA
	L'ESPRESSO		GAZZETTA DI REGGIO
	LE GUIDE DE L'ESPRESSO		LA NUOVA FERRARA
	LIMES		LA PROVINCIA PAVESE
	MICROMEGA		LA SENTINELLA DEL CANAVESE
Elemedia SpA	FANTACALCIO		MESSAGGERO VENETO
	LE GUIDE DEL FANTACALCIO		MESSAGGERO DEL LUNEDÌ
	CAPITAL MUSIC TIME		IL PICCOLO
	DEE		IL PICCOLO DEL LUNEDÌ
	PIANETA M2O		CORRIERE DELLE ALPI
Le Scienze SpA	LE SCIENZE	Effe Editore Srl	METRO BEACH
	MENTE & CERVELLO		METRO SUMMER
P.R.S. Srl	OK SALUTE		METRO MAG
Manintown Srl	MAN IN TOWN		METRO DIARIO
Unibeta Srl	IN SELLA		METRO SOUND
Seta SpA	ALTO ADIGE-TRENTINO		METRO RUN
Swan Group Srl	SPIRITO diVINO		METRO SNOW
	ARBITER		METRO STADIO
	KAIROS	Unimedia Srl	AL VOLANTE

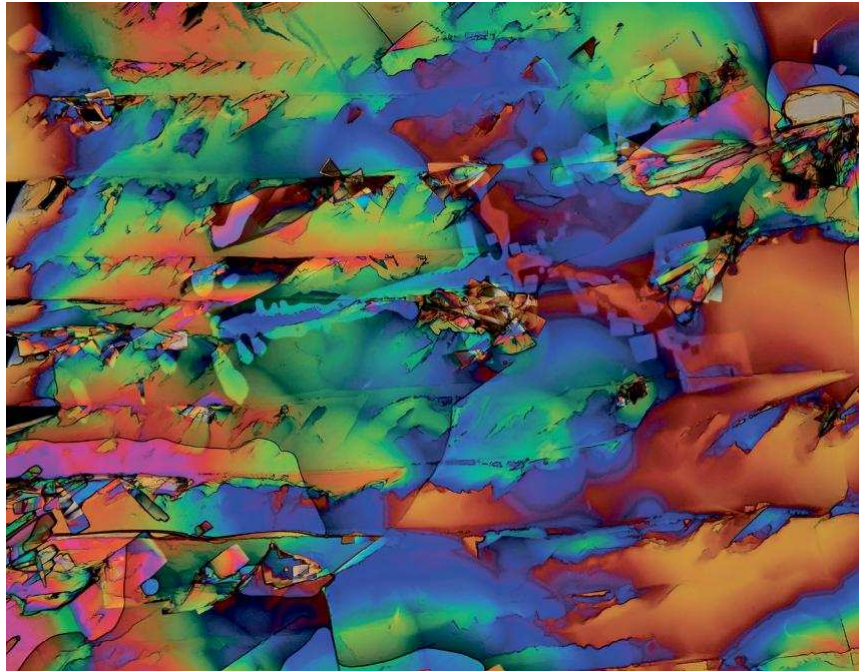
IMMUNOLOGIA

Il legame tra Parkinson e autoimmunità

Una prova diretta del rapporto tra la malattia e il malfunzionamento del sistema immunitario

Da quasi 100 anni si sospetta l'esistenza di un legame tra la malattia di Parkinson e un funzionamento non appropriato del sistema immunitario ma finora nessuno era riuscito a chiarirlo. David Sulzer del Columbia University Medical Center e colleghi del La Jolla Institute for Allergy and Immunology hanno finalmente fornito prove dirette.

Fino a qualche anno fa, si credeva che i neuroni fossero protetti dagli errori del nostro sistema immunitario. Poi, nel 2014, si è scoperto che quelli dopaminergici, colpiti dalla malattia di Parkinson, esprimono sulla loro superficie delle molecole, o antigeni, che li rendono vulnerabili agli attacchi dei linfociti T. Ma sono stati necessari altri anni di ricerca per avere la conferma che quello accade. Ora, un articolo su «Nature» descrive il meccanismo, e suggerisce che farmaci immunosoppressori potrebbero integrare le terapie.

Nella maggior parte dei malati, nei neuroni che producono dopamina - un neurotrasmettitore che ha molte funzioni, tra cui il controllo del movimento - si osservano strutture chiamate corpi di Lewy, principalmente composte da una forma anomala di una proteina detta alfa-sinucleina. Il suo accumulo è in grado di attivare i linfociti T, che scambiano i neuroni danneggiati per invasori stranieri, e li distruggono. I ricercatori hanno esposto campioni di sangue prelevati da 67 pazienti parkinsoniani e da 36 individui sani (controlli) a frammenti di alfa-sinucleina e di altre proteine che si trovano nei neuroni. Poi hanno cercato eventuali risposte autoimmuni scatenate dai frammenti.

Nei campioni di sangue dei controlli è stata osservata una scarsa attività immunitaria. Al contrario, i linfociti T nei campioni di sangue dei pazienti hanno mostrato una forte reazione ai frammenti proteici. La risposta autoimmune è stata associata a una variante di un gene comune nei malati di Parkinson. Non si sa ancora, però, se l'autoimmunità sia una causa scatenante della malattia, o se contribuisca solo in seguito alla morte neuronale.

Eugenio Melotti

Cancellare la memoria in modo selettivo

Forse un giorno sarà normale riuscire a cancellare ricordi solo in modo selettivo, senza che venga intaccato il resto della memoria. Per ora è riuscito a farlo un gruppo di ricercatori del Columbia University Medical Center a New York e della McGill University a Montreal, in Canada, ma solo in una lumaca marina del genere *Aplysia*, studiata spesso per la semplicità del suo sistema nervoso. Come descritto su «Current Biology», in *Aplysia* un solo neurone immagazzina differenti tipi di memoria, che a loro volta sono indotti dai segnali provenienti da altri tipi di neuroni (sensitivi e motori) in seguito a stimolazioni esterne. In generale, in tutti gli animali il cervello crea i ricordi a lungo termine principalmente rafforzando le connessioni tra le cellule nervose e mantenendole nel tempo, ma questo avviene con lo stesso meccanismo sia per la memoria associativa sia per quella non associativa. Dunque, agire indiscriminatamente su queste connessioni non consentirebbe di «resettare» selettivamente solo alcuni tipi di ricordi. Samuel Schacher del Columbia University Medical Center e colleghi si sono allora concentrati sul ruolo di alcuni enzimi (protein-chinasi M, PKM), osservando che la forza dei legami tra i neuroni prodotta dai differenti stimoli in realtà è mantenuta da due diverse forme di queste molecole per i due tipi di memoria (PKM Apl III per la memoria sinaptica associativa e PKM Apl I per la non associativa). Bloccando l'azione di una di queste, nella lumaca è stato così possibile «cancellare» solo alcuni tipi di tracce mnemoniche. Inoltre, si è anche scoperto che si può ottenere lo stesso risultato agendo su altre molecole implicate nella produzione delle protein-chinasi M. Poiché le PKM umane svolgono un ruolo analogo, i risultati lasciano ben sperare per la messa a punto di farmaci per disordini psichiatrici correlati direttamente ai ricordi, per esempio il disturbo post-traumatico da stress, in cui tipicamente un ricordo non associativo innesca una situazione di panico e ansia.

Marina Semiglia

A. Romero/Science Photo Library/AGF (*cristalli di dopamina*)

EPIDEMIOLOGIA

Una mappa mondiale del rischio di zoonosi

Stimato a livello globale il rischio di malattie trasmesse da mammiferi selvatici agli esseri umani

La maggior parte delle malattie infettive umane sono di origine zoonotica, con i virus che si sviluppano in specie di mammiferi selvatici per poi essere trasmessi all'uomo. La comprensione degli schemi di diffusione della diversità virale negli animali e i fattori che facilitano il passaggio tra specie sono quindi cruciali per i programmi di controllo e prevenzione di possibili pandemie. Ma oggi sono pochi gli strumenti utili alle istituzioni per identificare quali mammiferi hanno maggiori probabilità di essere portatori dei prossimi virus umani e quali tipologie virali possono fare il «salto di specie» con più facilità.

Uno studio su «Nature» ha mappato per la prima volta a livello globale il rischio che un virus patogeno diffuso in altri mammiferi possa trasferirsi all'uomo causando una nuova malattia. Innanzitutto, la ricerca, che ha analizzato 2800 interazioni tra virus e 754 specie di mammiferi, mostra che chirotteri, primati e roditori sono rispettivamente i gruppi da cui l'essere umano contrae più facilmente virus patogeni. Inoltre, come prevedibile, la probabilità di salto di specie è facilitata anche dal livello di parentela tra la specie che abitualmente ospita il virus e gli esseri umani. Cruciali si sono rivelate anche le peculiarità di ciascun virus e le opportunità di contatto con la nostra specie. Lo studio mostra che la trasmissione di determinate tipologie virali dipende anche dalle aree geografiche in cui vivono gli ospiti degli stessi virus zoonotici: per esempio, in Africa e Sudest asiatico è massimo il rischio di contrarre malattie dai primati, mentre in Sud e Centro America dai pipistrelli.

Mostrando che sia il tasso di infezioni virali nei diversi mammiferi sia il loro potenziale zoonotico sono in parte prevedibili, lo studio fornisce le prime informazioni utili per il monitoraggio delle malattie umane emergenti e la loro prevenzione, nonché potrebbe facilitare l'identificazione di potenziali nuovi focolai infettivi.

Andrea Romano

L'origine della resistenza agli antibiotici nei patogeni umani

Il successo della medicina nel trattamento di molte malattie infettive è messo a rischio dalla diffusione della resistenza agli antibiotici: si teme che in futuro diversi ceppi di batteri patogeni non potranno essere uccisi dai farmaci comunemente usati. La capacità di alcuni patogeni di resistere all'azione degli antibiotici potrebbe essere stata acquisita da un gruppo di batteri che vivono nel suolo, gli attinobatteri. L'idea non è nuova: già negli anni settanta alcuni scienziati avevano ipotizzato una forma di trasferimento genico orizzontale da attinobatteri ai batteri gram-negativi, ma senza avere una conferma sperimentale. Una ricerca, pubblicata sulla rivista «Nature Communications», sembra avvalorare questa ipotesi, identificando anche un meccanismo che avrebbe reso possibile il passaggio dei geni.
Xinglin Jiang e colleghi della Technical University of Denmark ha raccolto negli attinobatteri del genere *Streptomyces* un ampio campione di proteine codificate da geni noti per conferire resistenza agli antibiotici. In questi microrganismi, i geni in questione hanno per lo più una funzione auto-protettiva: gli attinobatteri producono antibiotici per competere con altri microbi, e hanno bisogno di una protezione per non subirne gli effetti. Confrontando le proteine degli *Streptomyces* con molecole omologhe presenti in patogeni umani, i ricercatori hanno notato una notevole somiglianza nella sequenza di amminoacidi. I risultati hanno portato gli scienziati a confermare l'ipotesi secondo cui i geni per la resistenza nei patogeni possono derivare da un trasferimento dagli attinobatteri. I ricercatori hanno individuato anche un possibile meccanismo per questo scambio. Inizialmente una sequenza di DNA sarebbe trasferita dai patogeni agli attinobatteri, in questo modo sono acquisiti i geni di antibioticoresistenza. Dopo la morte degli attinobatteri la sequenza sarebbe rilasciata nell'ambiente, e da qui nuovamente incorporata nei batteri patogeni.

Valentina Daelli

Nuwat Phansuwan/Shutterstock (*pipistrello*); Science Photo Library RF/AGF (*piastra di Petri*)

CLIMA

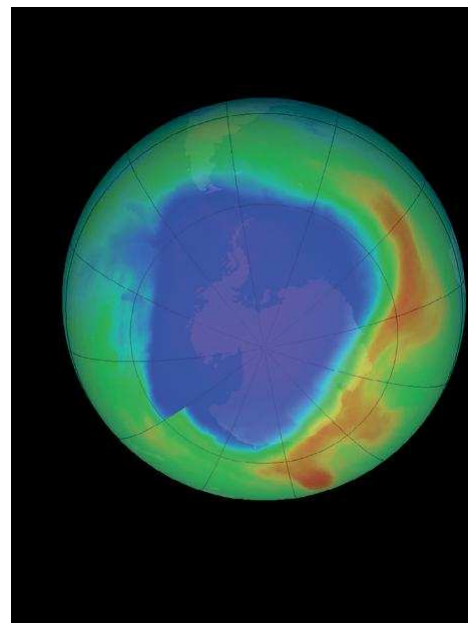
Il buco dell'ozono e le piogge

Le precipitazioni nell'emisfero sud sono influenzate anche da cambiamenti nella fascia di ozono

Ricordate il buco dell'ozono? Se ne parlava tanto qualche decennio fa; ora molto meno, perché la messa al bando dei clorofluorocarburi dai cicli refrigeranti e dalle bombolette spray lo sta facendo lentamente richiudere.

Lo strato di ozono stratosferico è importante perché blocca i raggi ultravioletti UV che possono causare tumori della pelle. Ma le variazioni in questo strato possono avere influenza anche sul clima. Del resto, se arrivano più UV sulla superficie terrestre, arriva anche più energia dal Sole, e viceversa. In realtà, quello che accade in stratosfera può avere conseguenze complesse sulla circolazione e sui fenomeni meteo. Stefan Brönnimann, dell'Università di Berna, e colleghi hanno studiato l'impatto delle variazioni degli ultimi decenni del buco dell'ozono (che compare soprattutto al Polo Sud) sulle piogge nell'emisfero meridionale, pubblicando i risultati su «Environmental Research Letters». Usando dati reali e modelli, i ricercatori hanno valutato il contributo dell'ozono stratosferico allo spostamento della cosiddetta «fascia di convergenza del Sud Pacifico», la zona con le precipitazioni più violente dell'emisfero meridionale. Già si sa che il riscaldamento globale ha influenzato il suo spostamento medio, ma altri cambiamenti possono essere stati causati da fattori stratosferici come l'ozono. Ebbene, Brönnimann e colleghi hanno identificato un ruolo specifico dei cambiamenti riscontrati nella fascia di ozono sulla circolazione atmosferica e sulle piogge nell'emisfero sud, con informazioni di dettaglio sulle varie zone: in particolare, hanno visto che questa influenza interessa anche le zone tropicali.

Il futuro, con la sperabile chiusura totale del buco dell'ozono, vedrà influenze che saranno di segno opposto a quelle riscontrate nel periodo di allargamento del buco. Questo studio può portare dunque a proiezioni più affidabili per le piogge nell'emisfero sud.

Antonello Pasini

Science Photo Library/AGF

La domesticazione dei gatti

Popolano le nostre case e i nostri video su Facebook, eppure sappiamo poco del percorso evolutivo che ha portato alla domesticazione dei gatti. Una ricerca ha ora analizzato il DNA antico di resti archeologici di questi felini, identificando due principali centri di domesticazione, in Egitto e in Medio Oriente. Gli scienziati si sono concentrati sul DNA mitocondriale, trasmesso solo per via materna, e hanno confrontato il patrimonio genetico di ritrovamenti antichi nell'area mediterranea con quello di gatti moderni. L'analisi ha confermato che delle cinque sottospecie di gatti selvatici è stata domesticata solo *Felis silvestris lybica*. I primi avvicinamenti dei gatti alla vita domestica sono probabilmente avvenuti in Anatolia 11.000 anni fa, come dimostra una caratteristica del DNA. In quel periodo i gatti hanno iniziato una relazione commensale con i primi insediamenti agricoli, uccidendo topi e altri animali infestanti. I risultati dello studio evidenziano che un'altra firma del DNA deriva dai gatti dell'antico Egitto, dove i felini hanno avuto anche un'importanza culturale. Abili cacciatori dei topi che infestavano le navi, infine, i gatti sono stati ospiti graditi durante i viaggi nel Mediterraneo, aumentandone la diffusione in Europa. **(VaDa)**

La diffusione spaziale dei dialetti

Un aspetto della cultura umana studiato in gran dettaglio sono i dialetti. Uno studio pubblicato su «Physical Review X» da James Burridge dell'Università di Portsmouth ha ora sviluppato un modello matematico ispirato alla meccanica statistica, in cui la diffusione spaziale delle varianti linguistiche deriva dall'interazione tra singoli individui.

L'evoluzione geografica dei dialetti si considera governata da un'interazione analoga alla tensione superficiale ai confini delle varie aree linguistiche. Il modello tiene conto della struttura territoriale e della densità locale di popolazione per determinare la posizione delle isoglosse, le curve che dividono i territori dove si usano dialetti diversi. Partendo da semplici ipotesi sulla mobilità dei parlanti e sulla tendenza a conformarsi alla variante dialettale udita più di frequente, il modello riproduce la forma delle aree linguistiche, le caratteristiche delle zone di transizione, la direzione delle isoglosse in varie situazioni e la diffusione dei tratti dialettali attorno ai centri urbani. Ulteriori studi potranno arricchire il modello tenendo conto delle distanze sociali, dei grandi spostamenti, di eventuali resistenze a conformarsi alle forme dialettali comuni e della curva di apprendimento linguistico al variare dell'età. **(SiKBa)**

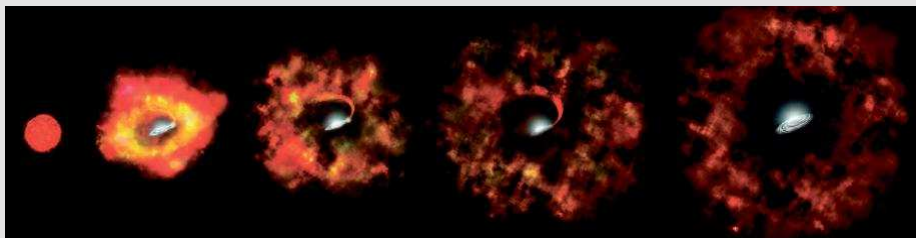
Evoluti per il rossore

Un gruppo di ricerca della New York University sostiene che la nostra visione cromatica si è evoluta per cogliere il rossore sulle guance degli altri. L'ipotesi più in voga dice che il sistema tricromatico umano è ottimale per trovare la frutta nel folto del fogliame, il principale nutrimento dei nostri antenati. Però c'è un'anomalia: i picchi di sensibilità di due dei tre recettori dei colori sono troppo vicini tra di loro, una soluzione poco efficiente per quello scopo, ma che invece funzionerebbe bene per cogliere le sottili variazioni di colore nella gamma del rosso sul viso e sul corpo dei nostri conspecifici. Questi arrossamenti sono segnali sociali che rendono evidenti le emozioni e anche, per molte specie, la disponibilità all'accoppiamento. Sui «Proceedings of the Royal Society B», James P. Higham e colleghi hanno mostrato che il sistema visivo di esseri umani e altri primati è il migliore per rilevare questo stimolo. Si tratta, dicono, della prima prova sperimentale di questo tipo. **(FeSg)**

Un buco nero stellare senza supernova

Gli astrofisici stimano che in galassie come la nostra possono esplodere da una a tre supernove al secolo. Tuttavia le osservazioni indicano un numero significativamente inferiore di queste esplosioni. Adesso, un gruppo di astronomi guidato da Scott Adams, del California Institute of Technology, a Pasadena, ha osservato per la prima volta la possibile spiegazione di questa discordanza : una supernova fallita. Secondo Scott e colleghi la prova che alcune stelle di grande massa possono trasformarsi in buchi neri senza passare dalla violenta esplosione di supernova verrebbe dall'osservazione di una stella, denominata N6946-BH1, nella galassia a spirale NGC 6946, distante 22 milioni di anni luce da noi. Nel 2009 questa stella, all'epoca una supergigante rossa con una massa stimata di circa 25 masse solari, ha aumentato leggermente la propria luminosità, come se stesse per diventare una supernova. Tuttavia, osservazioni successive mostrano che ora della stella non c'è più traccia. L'ipotesi più probabile è che si sia trasformata in buco nero saltando il passaggio dell'esplosione.

Nello studio, pubblicato su «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», i ricercatori stimano che il fenomeno di supernova fallita possa accadere dal 10 al 30 per cento delle stelle di grande massa. Numeri che spiegherebbero perché si osservano meno supernove di quanto atteso. **(EmRi)**

Maravic/iStock (*gatto*); diane39/iStock (*donna*); cortesia NASA/ESA/ P. Jeffries, STScI (*sequenza esplosione N6946-BH1*)

L'assalto delle meduse

Le meduse stanno diventando sempre più numerose nei nostri mari: la conferma arriva dai risultati di «Occhio alla medusa», un progetto di *citizen science*, organizzato da Ferdinando Boero, dell'Istituto di Scienze marine del CNR, che ha raccolto via email, fra il 2009 e il 2015, migliaia di segnalazioni di avvistamenti di meduse lungo le coste italiane fatte dai bagnanti, allertati da manifesti posti negli stabilimenti balneari.

Se nel 2009 gli avvistamenti di singole meduse sono stati 300, nel 2015 hanno superato i 3000, mentre quelli di branchi sono passati da 140 a 1200. Anche considerando il periodo di avvio del censimento, l'andamento sembra in crescita, con *Pelagia noctiluca*, *Aurelia aurita*, *Rhizostoma pulmo* le specie più diffuse. L'aumentata diffusione di questi animali è dovuta probabilmente al riscaldamento delle acque e alla pesca eccessiva, che priva i mari di competitori e predatori delle meduse. Il censimento continua con la *app* per *smartphone* Meteo Meduse. (AlSa)

Guardo, imparo ed eseguo come un robot

Lo chiamano *learning by demonstration*, apprendimento mediante dimostrazione, ed è l'ultima frontiera della programmazione dei robot. Consiste nell'insegnare con l'esempio quello che deve fare a una macchina senza bisogno di scrivere codice. Esistono già robot del genere, a cui si possono impartire semplici compiti guidandoli con la mano una volta per fare in modo che ripetano il gesto. Ma spesso la guida manuale non è così precisa e movimenti complessi diventano difficili da insegnare. Claudia Perez-D'Arpino e Julie A. Shah del Massachusetts Institute of Technology hanno ragionato sul tema e messo a punto un sistema, C-Learn, che facilita i robot nell'apprendimento di azioni complesse.

C-Learn fornisce ai robot un set di movimenti, adatti anche a diversi sistemi di presa o pinze di cui la macchina può essere dotata, grazie a cui basta solo osservare un'altra macchina mentre effettua un'azione per poi ripeterla alla perfezione. Questo avviene non solo tra robot identici, ma anche tra modelli dotati di cinematiche diverse. Lo scopo è velocizzare la programmazione e messa in opera di queste macchine, che oggi devono essere programmate una a una. Con C-Learn basta invece istruire un solo robot per fare in modo che anche tutti gli altri in un impianto imparino subito quello che devono fare. (RiOl)

Ipotesi di panspermia

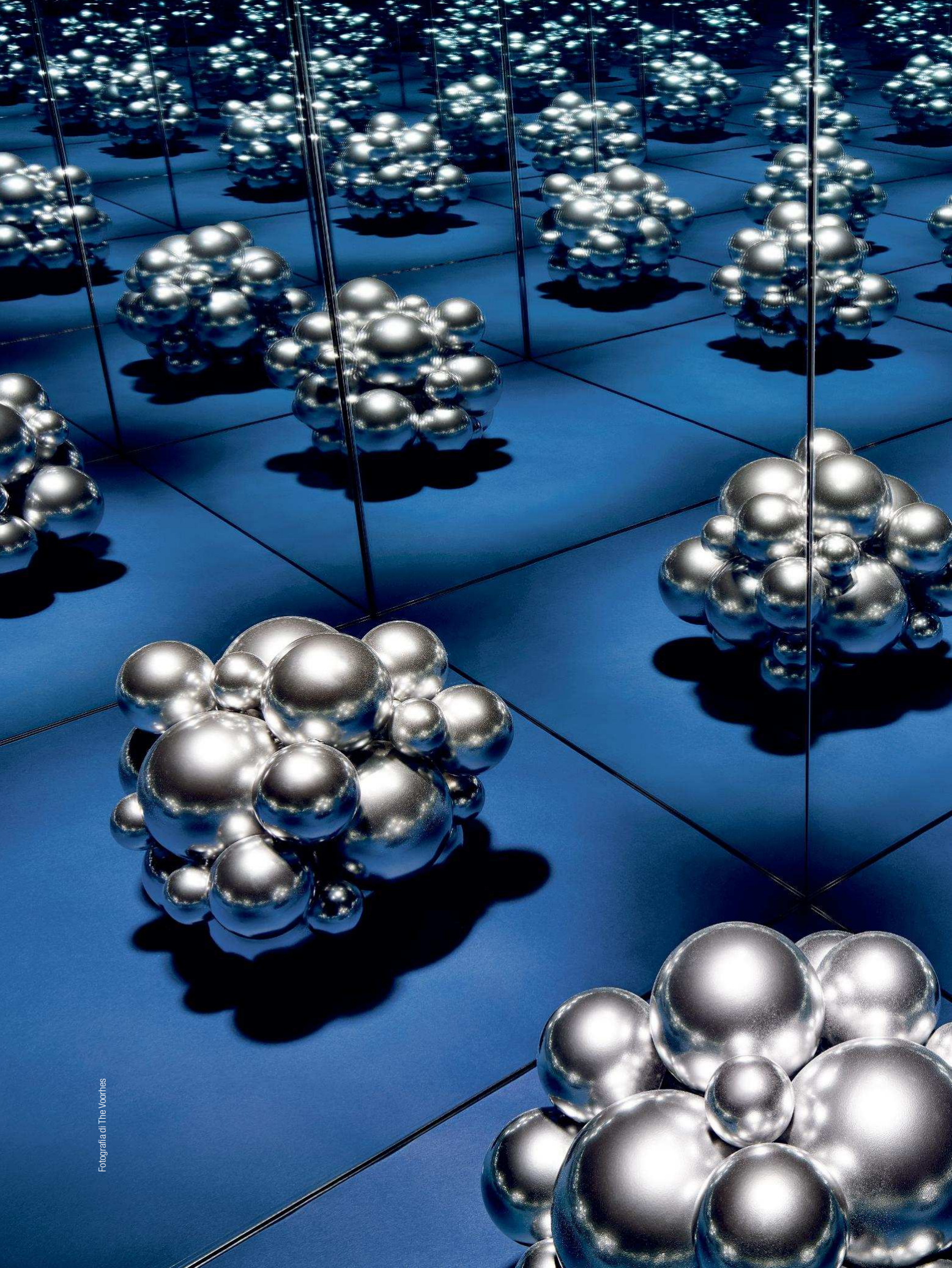
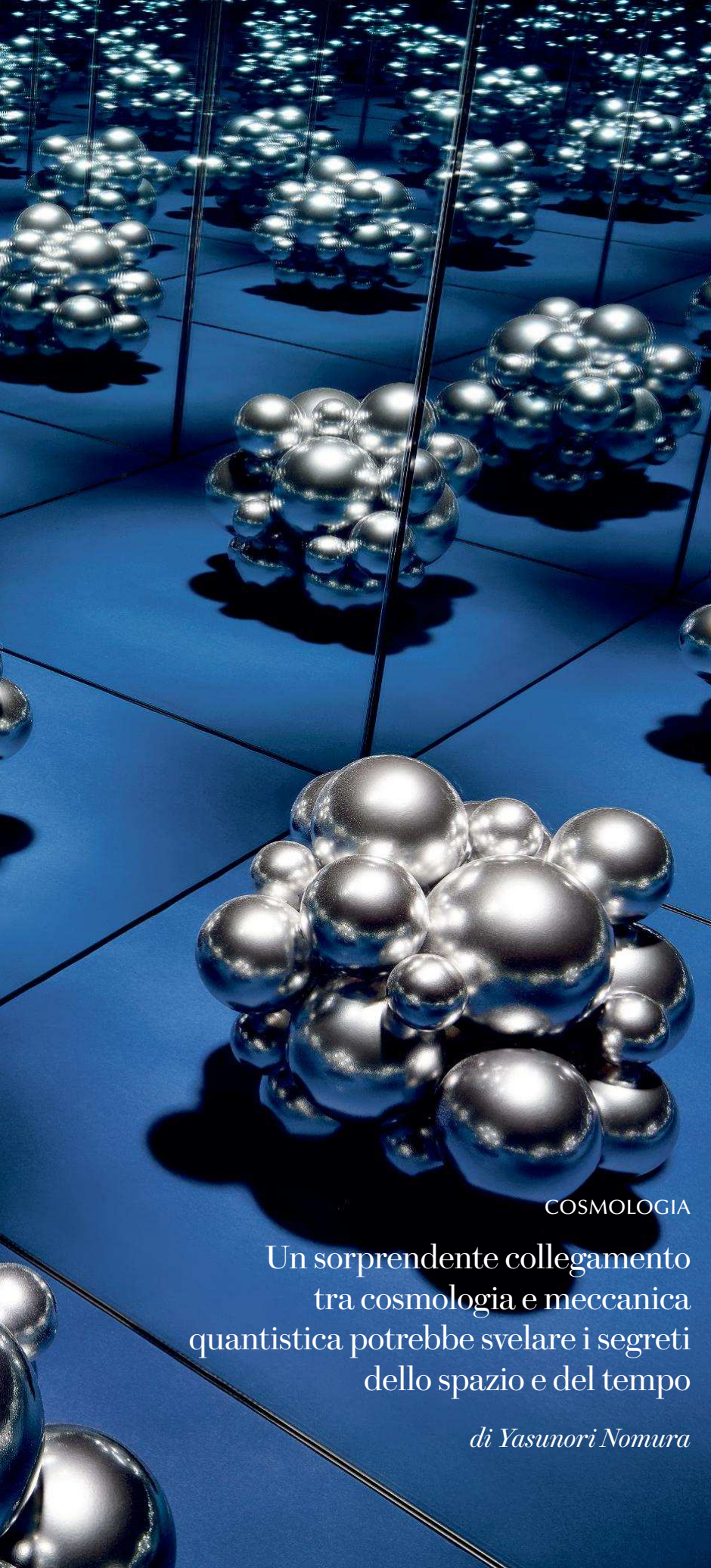
Il sistema planetario TRAPPIST-1, distante da noi circa 39 anni luce, è costituito da una nana rossa attorno alla quale orbitano sette pianeti, di cui i sei più interni con ogni probabilità rocciosi. Fra i sette pianeti, inoltre, cinque sono di dimensioni simili a quelle della Terra, mentre due sono di dimensioni intermedie fra Terra e Marte. Inoltre, tre di questi pianeti si trovano nella «zona abitabile», ovvero nelle condizioni di avere l'acqua allo stato liquido sulla superficie. Quando pochi mesi fa ne è stata annunciata la scoperta,

qualche scienziato aveva sostenuto che là fosse molto probabile la presenza di vita aliena. Ma Manasvi Lingam, della Harvard University, e Abraham Loeb, dell'Harvard–Smithsonian Center for Astrophysics propongono sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» che fra quei pianeti sia addirittura attivo il meccanismo della panspermia interplanetaria, cioè del passaggio di forme di vita da un pianeta all'altro. Secondo i modelli elaborati da Lingam e Loeb, i pianeti di TRAPPIST-1 orbitano così vicini fra loro che la probabilità di trasferimento di forme di vita per mezzo di comete o asteroidi sarebbe diversi ordini di grandezza più alta che nel sistema solare, in particolare fra Terra e Marte. (EmRi)

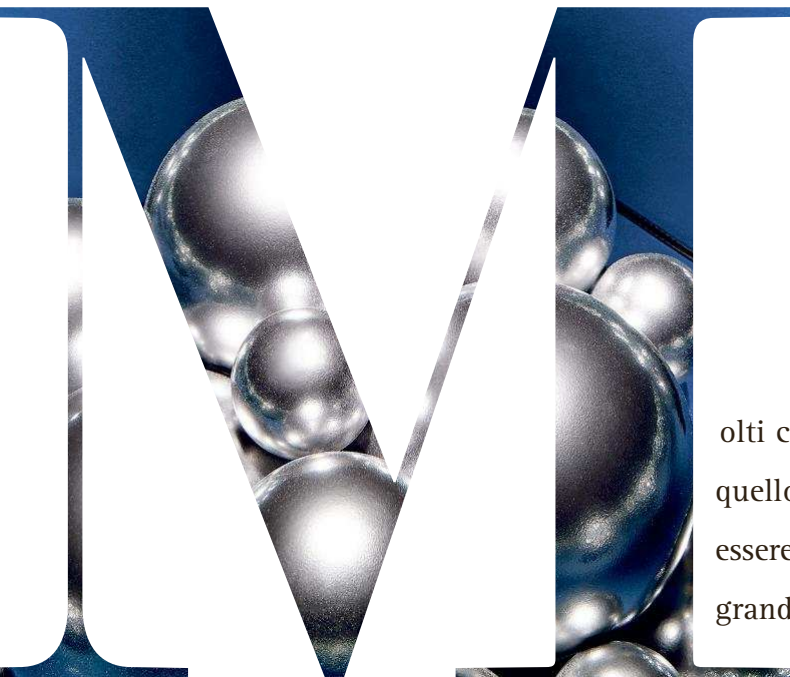
Le forme dell'acqua allo stato liquido

Non chiamatela acqua ma acque: uno studio effettuato da ricercatori dell'AlbaNova University Center di Stoccolma, e pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», ha dimostrato che le molecole di acqua allo stato liquido oscillano continuamente tra due fasi distinte, sia in termini di struttura sia di densità. L'indizio che ciò fosse possibile, anzi probabile, era noto da oltre un secolo, tanto che il primo a ipotizzarlo fu il fisico tedesco Wilhelm Röntgen suggerendo che le peculiari proprietà dell'acqua potessero dipendere da questa interazione. Quando la temperatura scende molto lentamente, l'acqua non congela nell'ordinata struttura cristallina che ben conosciamo ma in una matrice amorfa che rappresenta la forma dominante in natura. A sua volta, il ghiaccio amorfo si presenta in due forme distinte, una ad alta e l'altra a bassa densità.
Combinando spettrografia a raggi X e diffrattometria ad ampio angolo, i ricercatori hanno immortalato la struttura e le dinamiche delle molecole con un dettaglio mai raggiunto prima, scoprendo che anche in fase liquida l'acqua può coesistere in due stati diversi: un liquido viscoso e uno ultraviscoso, di densità molto più bassa. «L'acqua non è un liquido complicato, ma due liquidi semplici con un rapporto complicato», ha riassunto Lars Pettersson, professore di chimica fisica teorica, tra gli autori dello studio. (DaMi)

adamkaz/iStock (*meduse*); cortesia NASA (*illustrazione TRAPPIST-1*); hdere/iStock (*bicchieri*)

Il multiverso quantistico

COSMOLOGIA

Un sorprendente collegamento tra cosmologia e meccanica quantistica potrebbe svelare i segreti dello spazio e del tempo

di Yasunori Nomura

Yasunori Nomura è professore di fisica e direttore del Berkeley Center for Theoretical Physics all'Università della California a Berkeley. È anche *senior faculty scientist* al Lawrence Berkeley National Laboratory e *principle investigator* al Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe dell'Università di Tokyo.

Molti cosmologi accettano oggi l'idea straordinaria che quello che sembra l'intero universo potrebbe in realtà essere solo una piccola parte di una struttura molto più grande, detta multiverso. In questa visione esistono più universi, e le regole che ritenevamo leggi fondamentali della natura assumono forme diverse in ciascuno di essi; per esempio, tipi e proprietà delle particelle elementari possono differire da un universo all'altro.

L'idea del multiverso emerge da una teoria secondo cui il cosmo, nei suoi primi istanti, si sarebbe espanso esponenzialmente. Durante questo periodo di «inflazione», alcune regioni dello spazio avrebbero arrestato la loro rapida espansione prima di altre, formando i cosiddetti universi bolla, analoghi alle bolle dell'acqua bollente. Il nostro universo sarebbe solo una di queste bolle, e al di là se ne troverebbero infinite altre.

L'idea che il nostro intero universo sia solo una parte di una struttura molto più grande non è, di per sé, assurda come sembra. Nel corso della storia gli scienziati hanno appreso molte volte che il mondo visibile è ben lontano dal costituire tutto quello che esiste. Eppure il concetto di multiverso, con il suo numero illimitato di universi bolla, presenta un grosso problema teorico: sembra cancellare la possibilità della teoria dell'inflazione di formulare previsioni, un requisito centrale di ogni teoria utile. Per dirla con Alan Guth, del Massachusetts Institute of Technology, uno dei creatori della teoria dell'inflazione, «in un universo in eterna inflazione, tutto quello che può accadere accadrà; anzi, accadrà un numero infinito di volte».

In un unico universo, in cui gli eventi si verificano un numero finito di volte, gli scienziati possono calcolare la probabilità relativa che si verifichi un evento rispetto a un altro confrontando il numero di volte che questi eventi si verificano. Invece, in un multiverso in cui tutto accade un numero infinito di volte, un conteggio simile non è possibile e nessun evento è più probabile di un altro. Si può fare qualsiasi previsione si voglia, e sarà destinata ad avverarsi in qualche universo, ma questo fatto non ci dice niente su che cosa accadrà nel nostro specifico mondo.

Questa mancanza di potenza predittiva ha turbato a lungo i fisici. Ora alcuni ricercatori, fra cui il sottoscritto, hanno capito che la teoria dei quanti – che, a differenza del concetto di multiverso, si occupa delle più piccole particelle esistenti – può inaspettatamente aiutare a trovare una soluzione. Per la precisione, l'immagine cosmologica del multiverso in inflazione eterna può essere matematicamente equivalente all'interpretazione dei «molti mondi» della meccanica quantistica, che cerca di spiegare come le particelle sembrerebbero trovarsi in molti luoghi contemporaneamente. Come vedremo, una connessione del genere tra le teorie non solo risolve il problema della previsione, ma può anche rivelare sorprendenti verità sullo spazio e sul tempo.

Molti mondi quantistici

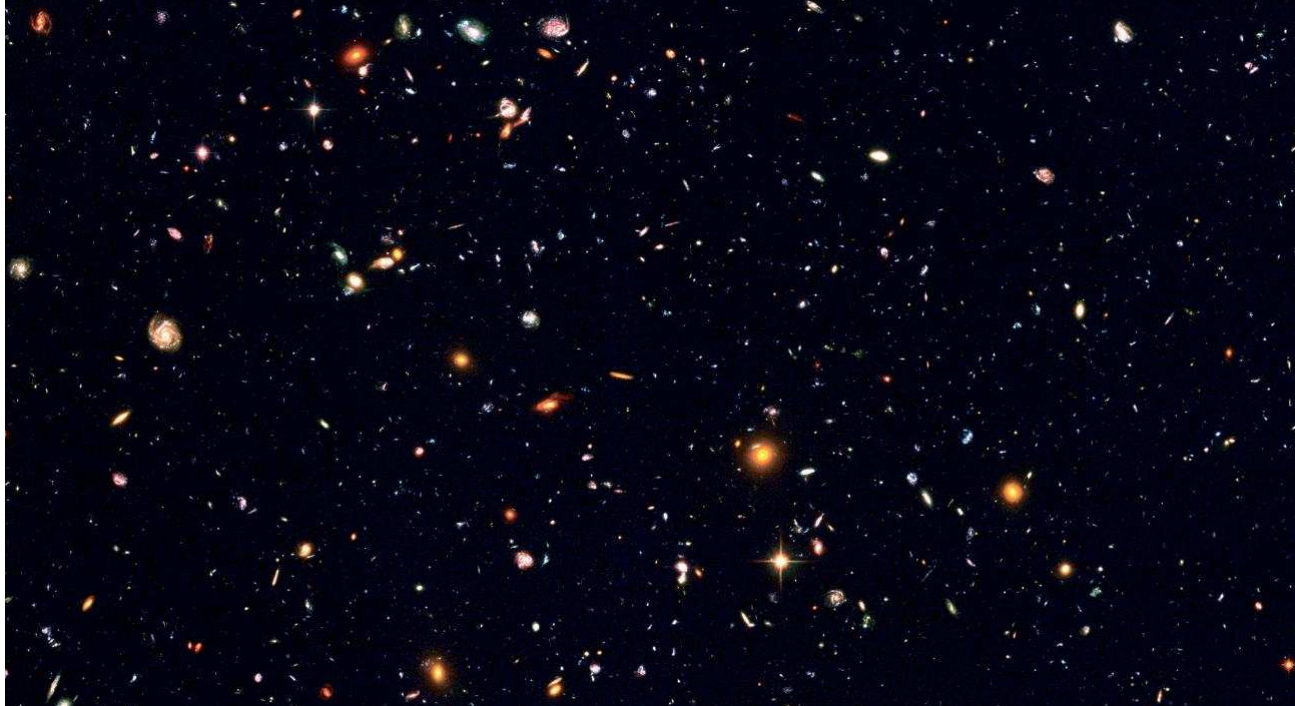
Sono giunto all'idea di una corrispondenza tra le due teorie dopo aver ripensato ai principi basilari dell'interpretazione dei molti mondi della meccanica quantistica, concetto nato per dare senso ad alcuni degli aspetti più strani della fisica quantistica. Nel mondo quantistico – un luogo tutt'altro che intuitivo – cause ed effetti funzionano in modo molto diverso rispetto al mondo macroscopico, e il risultato di ogni processo è sempre probabilistico. Mentre nella nostra esperienza macroscopica possiamo prevedere dove finirà una palla dopo essere stata lanciata, dati punto di partenza, velocità e altri fattori, se quella palla fosse una particella quantistica potremmo solo dire che ha una certa probabilità di finire qui e una certa altra probabilità di finire là. Questa natura probabilistica non può essere evitata sapendone di più riguardo alla palla, alle correnti d'aria o ad altri dettagli; è una proprietà intrinse-

IN BREVE

La teoria dell'inflazione cosmica, secondo cui l'universo delle origini si sarebbe espanso esponenzialmente, suggerisce che non viviamo in un universo, ma in un vasto multiverso.

Ma al problema dell'idea del multiverso è che tutti gli eventi che si possono verificare si verificano infinitamente, annullando l'abilità predittiva della teoria.

I fisici hanno capito che il problema si può risolvere considerando il multiverso come equivalente a un concetto della meccanica quantistica detto interpretazione dei molti mondi, in cui si ipotizza che il nostro universo sia uno dei tanti che coesistono nello spazio di probabilità piuttosto che in un unico spazio reale.

Cortesia NASA/ESA/S. Beckwith STScI e HUBBLE DEEP FIELD Team

Il campo ultraprofondo del telescopio spaziale Hubble mostra galassie distanti fino a 13 miliardi di anni luce. Oggetti molto più lontani saranno per sempre fuori dalla nostra portata perché l'espansione dello spazio li fa allontanare più rapidamente della velocità della luce. Questo orizzonte cosmologico ha importanti conseguenze per la teoria del multiverso.

ca dell'ambito quantistico. La stessa identica palla, lanciata nelle stesse identiche condizioni, finisce a volte nel punto A e altre volte nel punto B. Questa conclusione può sembrare strana, ma le leggi della meccanica quantistica sono state confermate da innumerevoli esperimenti e descrivono come funziona la natura sulla scala delle particelle e delle forze subatomiche.

Nel mondo quantistico diciamo che dopo che è stata lanciata, ma prima di guardare dove ha toccato terra, la palla si trova in un cosiddetto stato di sovrapposizione degli esiti A e B, cioè non è né nel punto A né nel punto B, bensì si trova in una nebbia probabilistica di entrambi i punti A e B (più molte altre posizioni). Quando però guardiamo e troviamo la palla in un certo posto – il punto A, per esempio – poi chiunque altro esamini la palla potrà confermare che si trova in A. In altre parole, prima che un sistema quantistico venga misurato il suo esito è incerto, mentre dopo tutte le misurazioni successive troveranno lo stesso risultato della prima.

Nella spiegazione convenzionale della meccanica quantistica, la cosiddetta interpretazione di Copenhagen, si descrive questo cambiamento affermando che la prima misurazione ha cambiato lo stato del sistema da uno stato di sovrapposizione allo stato A. Ma sebbene l'interpretazione di Copenhagen preveda i risultati degli esperimenti di laboratorio, porta a gravi difficoltà a livello concettuale. Che cosa significa una «misurazione» e perché cambia lo stato del sistema da una sovrapposizione di possibilità a una singola certezza? Si ha un cambiamento di stato quando un cane o magari una mosca osservano il sistema? Che cosa succede quando una molecola nell'aria interagisce con il sistema, eventualità che ci aspettiamo avvenire di continuo, ma che di solito non trattiamo come una misurazione che può interferire con il risultato? O c'è qualche significato fisico speciale nel fatto che un essere umano apprenda consapevolmente lo stato del sistema?

Nel 1957 Hugh Everett III, quando era dottorando alla Princeton University, sviluppò l'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica, che affronta la questione in maniera mirabile, sebbene all'epoca molti la accolsero ridicolizzandola, e ancora oggi è un'idea che gode di meno favore rispetto all'interpretazione di Copenhagen. L'intuizione chiave di Everett fu che lo stato di un sistema quantistico riflette lo stato dell'intero universo intorno a sé, cosicché dobbiamo includere l'osservatore in una descrizione completa della misurazione. In altre parole, non possiamo considerare la palla, il vento e la mano che la lanciano da soli: dobbiamo includere nella descrizione anche la persona che arriva a controllare il punto di atterraggio e tutto il resto del cosmo in quel momento. In questa visione delle cose, lo stato quantistico dopo la misurazione è ancora una sovrapposizione, ma non solo di due punti di atterraggio, bensì di due mondi interi. Nel primo mondo, l'osservatore scopre che lo stato del sistema è diventato A, e dunque qualsiasi osservatore in questo particolare mondo otterrà il risultato A in tutte le misurazioni successive. Ma quando è stata effettuata la misurazione un altro universo si è separato dal primo, e in questo l'osservatore scopre, e continua a scoprire, che la palla è atterrata nel punto B. Questa caratteristica spiega perché l'osservatore pensa che la sua misurazione cambi lo stato del sistema; quello che è veramente accaduto è che quando effettua una misurazione (interagisce con il sistema), si divide in due persone diverse che vivono in due mondi paralleli diversi corrispondenti a due risultati distinti, A e B.

In questa visione delle cose gli esseri umani che effettuano le misurazioni non hanno alcun significato speciale. Lo stato del mondo intero continua a ramificarsi in molti possibili mondi paralleli che coesistono sovrapposti. Un osservatore umano, in quanto parte della natura, non può sfuggire a questo ciclo: l'osservatore continua a dividersi in molti osservatori che vivono in molti possibili mondi paralleli e tutti sono altrettanto «reali». Un'ovvia ma importante conseguenza di questa impostazione è che in natura tutto rispetta le leggi della meccanica quantistica, dalla scala più piccola a quella più grande.

Che cosa ha a che fare questa interpretazione della meccanica quantistica con il multiverso che abbiamo considerato all'inizio, che sembra esistere in uno spazio reale continuo invece che come realtà parallele? Nel 2011 ho sostenuto che il multiverso in eterna inflazione e i molti mondi della meccanica quantistica al-

L'inflazione incontra i molti mondi

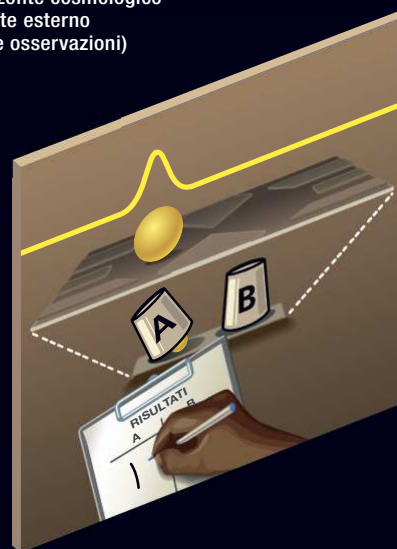
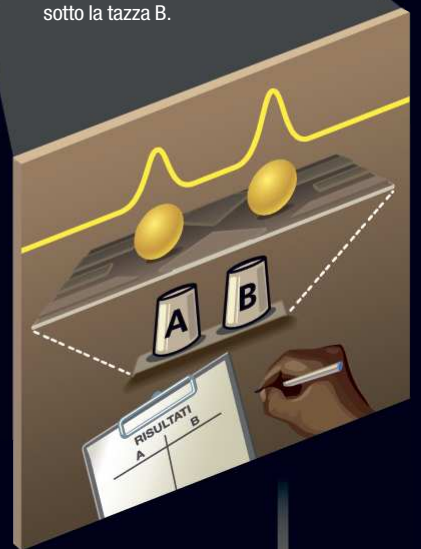
Secondo la teoria dell'inflazione il nostro universo sarebbe uno degli infiniti che si formarono quando il cosmo dei primissimi istanti si espanse esponenzialmente. Questa idea di un multiverso, però, sembra distruggere la capacità della teoria di formulare previsioni, perché tutto quello che può succedere in un multiverso infinito avverrà infinite volte. Ma il problema è risolto se il multiverso inflazionario è equivalente all'interpretazione dei «molti mondi» della meccanica quantistica, secondo cui tutti questi universi non coesistono in un unico spazio reale, ma nello «spazio di probabilità».

Multiverso inflazionario

Questa teoria sostiene che, durante l'inflazione, alcune regioni avrebbero rallentato la loro rapida espansione prima di altre, formando bolle che diventavano universi a sé stanti. Con il passare del tempo, sempre più regioni rallentavano a formare nuove bolle all'interno dello spazio in inflazione, che continuava a espandersi in eterno. Il nostro universo è solo una di queste bolle.

Molti mondi

Secondo la meccanica quantistica una particella, anziché essere nascosta sotto la tazza A o sotto la tazza B, esiste in realtà sotto entrambe con una certa probabilità (*indicata dall'onda gialla*) di essere trovata in un dato luogo. Solo quando un osservatore rovescia le tazze per controllare la particella «sceglie» di essere in una delle due posizioni possibili. L'interpretazione dei molti mondi suggerisce che ogni volta che un osservatore effettua una misurazione del genere si diramano due nuovi universi: uno in cui la particella ha finito per trovarsi sotto la tazza A e uno dove la particella sta sotto la tazza B.

Questo diagramma è molto semplificato per chiarezza. Nella teoria del multiverso le bolle possono anche formarsi all'interno di altre bolle

Il macro incontra il micro

Il multiverso inflazionario potrebbe essere identico all'interpretazione dei molti mondi della meccanica quantistica, se la formazione di nuovi universi bolla è semplicemente un esempio di ramificazione quanto-meccanica come viene vista da un solo ipotetico osservatore: la formazione di una nuova bolla è equivalente a ottenere il risultato di una misurazione. Questa descrizione risolve il problema della predittività della teoria dell'inflazione, perché in questo caso gli infiniti universi bolla coesistono probabilisticamente invece che in uno spazio reale. In questa visione delle cose, l'osservatore in un multiverso sottoposto a inflazione può formulare previsioni – un requisito di qualsiasi teoria scientifica utile – basandosi sulla probabilità che un evento si verifichi.

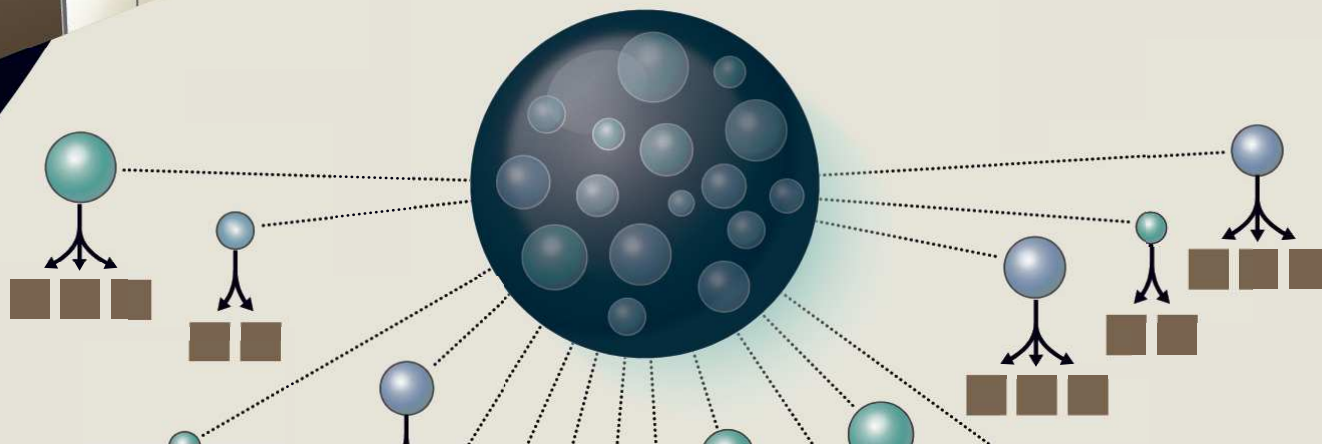
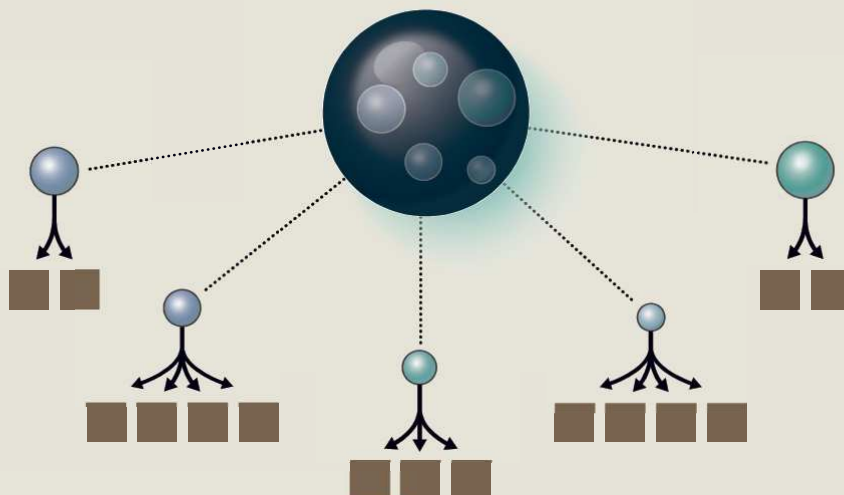
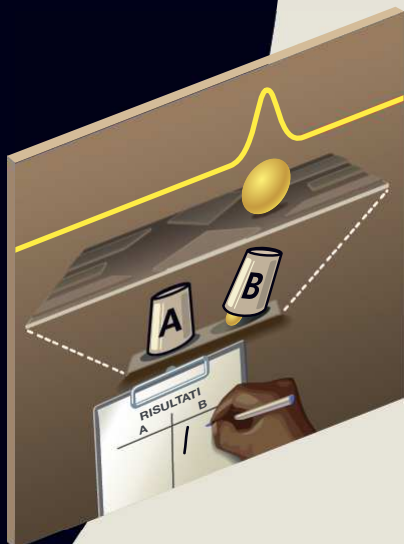



Illustrazione di Jen Christiansen

la Everett sono lo stesso concetto in un senso ben preciso. Da questo punto di vista, lo spazio di estensione infinita associato all'inflazione eterna è una sorta di «illusione»: i numerosi universi bolla dell'inflazione non esistono tutti in un solo spazio reale, ma rappresentano i possibili rami diversi dell'albero probabilistico. Nello stesso periodo in cui ho formulato questa proposta, Raphael Bousso, dell'Università della California a Berkeley, e Leonard Susskind, della Stanford University, hanno presentato un'idea simile. Se si rivelerà vera, l'interpretazione a molti mondi del multiverso significherebbe che le leggi della meccanica quantistica non operano esclusivamente in ambito microscopico, ma svolgono un ruolo cruciale nella determinazione della struttura globale del multiverso anche alle scale più grandi.

Il dilemma del buco nero

Per spiegare meglio come l'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica possa descrivere il multiverso inflazionario, devo fare una breve digressione e parlare di buchi neri. I buchi neri sono deformazioni estreme dello spazio-tempo, la cui potente gravità impedisce agli oggetti che ci cadono dentro di allontanarsi. Per questo forniscono un terreno di prova ideale per la fisica che riguarda intensi fenomeni quantistici e gravitazionali. C'è un esperimento mentale, a proposito di questi oggetti, che chiarisce dove fallisce il modo tradizionale di pensare al multiverso, rendendo impossibili le previsioni.

Supponiamo di lasciar cadere un libro in un buco nero e osservare dall'esterno che cosa succede. Mentre il libro stesso non potrà mai sfuggire al buco nero, la teoria prevede che l'informazione contenuta nel libro non si perda: dopo che il libro sarà stato dilaniato dalla gravità del buco nero e dopo che il buco nero stesso sarà gradualmente evaporato emettendo una tenue radiazione (fenomeno noto come radiazione di Hawking, scoperto dal fisico Stephen Hawking, dell'Università di Cambridge), gli osservatori esterni potrebbero ricostruire tutta l'informazione contenuta nel libro di partenza esaminando attentamente la radiazione che si è liberata. Già prima che il buco nero sia completamente evaporato l'informazione del libro inizia a riversarsi lentamente fuori grazie alla radiazione di Hawking.

Se però pensiamo alla stessa situazione dal punto di vista di qualcuno che sta cadendo nel buco nero insieme al libro, si verifica una cosa curiosa. In questo caso pare che il libro si limiti a passare attraverso il confine del buco nero e a rimanere all'interno. Così, per questo osservatore interno, il buco nero conterrà per sempre l'informazione del libro, mentre d'altra parte ci siamo appena convinti che dal punto di vista di un osservatore distante l'informazione sarà all'esterno. Qual è la versione corretta? Si potrebbe pensare che l'informazione sia semplicemente duplicata: una copia all'interno e l'altra all'esterno, ma questa soluzione è impossibile. In meccanica quantistica, il teorema di *no-cloning* (non-clonazione) impedisce una copia fedele completa dell'informazione. Quindi, sembra che le due visioni del mondo dei due osservatori non possano essere entrambe vere.

Gerard 't Hooft, dell'Università di Utrecht, nei Paesi Bassi, Susskind e i loro collaboratori hanno proposto la seguente soluzione: le due immagini possono essere entrambe valide, ma non contemporaneamente. Se siamo osservatori lontani, allora l'informazione sarà fuori. Non è necessario descrivere l'interno del buco nero, perché non vi si può mai accedere neanche in linea di principio; anzi, per evitare la clonazione dell'informazione dobbiamo considerare inesistente lo spazio-tempo all'interno. D'altra parte, per un osservatore che cade nel buco nero esiste solo l'interno, che contiene il libro e la sua informazione. Questa spiegazione però è possibile solo a patto di ignorare la radiazione di Hawking emessa dal buco nero, ma è consentito farlo, perché una volta attraversato il confine del buco nero siamo intrappolati all'interno, tagliati fuori dalle radiazioni emesse dal confine. Non c'è nessuna incoerenza in nessuno di questi due punti di vista; è solo quando li «cuciamo insieme» artificialmente – il che è impossibile fisicamente, dato che non si può essere contemporaneamente un osservatore distante e uno che cade dentro – che si verifica l'apparente incoerenza della clonazione dell'informazione.

Orizzonti cosmologici

Questo aspetto enigmatico dei buchi neri potrebbe sembrare non collegato al problema di come possano essere collegati l'idea dei molti mondi della meccanica quantistica e il multiverso, ma in realtà il confine di un buco nero è simile in modi importanti al cosiddetto orizzonte cosmologico, cioè il confine della regione dello spazio-tempo all'interno della quale possiamo ricevere segnali dallo spazio lontano. Questo orizzonte esiste perché lo spazio si espande in modo esponenziale, e gli oggetti al di là di questa linea di demarcazione si allontanano più velocemente della velocità della luce: quindi qualsiasi messaggio proveniente da loro non potrà mai raggiungerci. La situazione dunque è simile a un buco nero visto da un osservatore lontano. Inoltre, come nel caso del buco nero, la meccanica quantistica richiede che un osservatore all'interno dell'orizzonte consideri lo spazio-tempo dall'altra parte del confine – in questo caso, l'esterno dell'orizzonte cosmologico – come inesistente. Se considerassimo sia questo spazio-tempo esterno sia l'informazione che si potrebbe recuperare in un secondo momento dall'orizzonte (l'analogo della radiazione Hawking nel caso del buco nero), conteremmo più volte la stessa informazione. Questo problema implica che qualsiasi descrizione dello stato quantistico dell'universo deve includere solo la regione dentro e sull'orizzonte; in particolare, non ci può essere uno spazio infinito in nessuna descrizione unitaria e coerente del cosmo.

Il confine di un buco nero è simile al cosiddetto orizzonte cosmologico, cioè il confine della regione dello spazio-tempo all'interno della quale possiamo ricevere segnali dallo spazio lontano

Se uno stato quantistico corrisponde solo alla regione interna all'orizzonte, allora dove si trova il multiverso, che pensavamo esistesse in uno spazio infinito in eterna inflazione? La risposta è che la creazione di universi bolla è probabilistica, proprio come qualsiasi altro processo nella meccanica quantistica. Così come una misurazione quantistica può generare molti diversi risultati distinti in base alla loro probabilità di verificarsi, l'inflazione è in grado di produrre molti universi diversi, ciascuno con una differente probabilità di diventare reale. In altre parole, lo stato quan-

tistico che rappresenta lo spazio in inflazione eterna è una sovrapposizione di mondi – o ramificazioni – che rappresentano più universi, e ognuna di queste ramificazioni include solo la regione all'interno del proprio orizzonte.

Poiché ognuno di questi universi è di dimensioni finite, evitiamo il problema della predittività sollevato dall'ipotesi di uno spazio infinitamente grande che comprende tutti i possibili risultati. Gli universi multipli, in questo caso, non esistono tutti simultaneamente nello spazio reale: convivono solo nello «spazio di probabilità», come possibili risultati delle osservazioni fatte da persone che vivono in ogni mondo. Così ogni universo, ogni possibile risultato, conserva una probabilità specifica di essere in atto.

Questa visione delle cose unifica il multiverso in eterna inflazione della cosmologia e i molti mondi di Everett. La storia cosmica si svolge quindi così: il multiverso comincia da un certo stato iniziale ed evolve in una sovrapposizione di molti universi bolla. Con il passare del tempo, gli stati che rappresentano ciascuna di queste bolle si ramificano ulteriormente in sovrapposizioni di stati che rappresentano i vari esiti possibili di «esperimenti» effettuati in quegli universi (non deve trattarsi necessariamente di esperimenti scientifici; possono essere processi fisici qualsiasi). A un certo punto lo stato che rappresenta l'intero multiverso arriverà a contenere un enorme numero di rami, ciascuno dei quali rappresenta un mondo possibile che può sorgere dallo stato iniziale. Le probabilità date dalla meccanica quantistica determinano quindi i risultati dei fenomeni cosmologici e microscopici. Il multiverso e i molti mondi quantistici sono in realtà la stessa cosa; si riferiscono semplicemente allo stesso fenomeno – la sovrapposizione – che si verifica su scale molto diverse.

Io e altri fisici stiamo approfondendo l'idea del multiverso quantistico a livello teorico. Come possiamo determinare lo stato quantistico dell'intero multiverso? Che cos'è il tempo e da dove emerge?

In questa nuova visione delle cose, il nostro mondo è solo uno fra tutti i mondi possibili che sono permessi dai principi fondamentali della fisica quantistica e che esistono contemporaneamente nello spazio di probabilità.

Che cosa c'è oltre

Per sapere se questa idea è corretta, vorremmo metterla alla prova sperimentalmente. Ma è possibile? In effetti, esiste uno specifico fenomeno la cui scoperta darebbe sostegno alla nuova teoria. Il multiverso potrebbe portare a una lieve curvatura spaziale negativa nel nostro universo; in altre parole, gli oggetti si sposterebbero nello spazio non lungo linee rette come in un universo piatto, ma lungo curve, anche in assenza di gravità. Questa curvatura potrebbe verificarsi perché, sebbene gli universi bolla siano di dimensioni finite visti nell'ambito dell'intero multiverso, gli osservatori all'interno di una bolla percepirebbero il loro universo come infinitamente grande, il che renderebbe lo spazio apparentemente dotato di curvatura negativa (un esempio di curvatura negativa è la superficie di una sella, mentre la superficie di una sfera ha curvatura positiva). Se fossimo all'interno di una di queste bolle, lo spazio ci apparirebbe quindi deformato.

Finora le osservazioni indicano che il cosmo è piatto, ma nei prossimi decenni gli esperimenti che studiano come la luce lontana curva mentre percorre il cosmo potranno migliorare le misurazioni della curvatura del nostro universo di circa due ordini di grandezza. Se questi esperimenti rileveranno anche una minima curvatura negativa, sosterranno il concetto di multiverso perché, sebbene questa curvatura sia tecnicamente possibile anche in un unico universo, è poco plausibile. In particolare, un'eventuale rilevazione sosterrebbe l'ipotesi del multiverso quantistico descritto, perché corrisponderebbe a una curvatura sufficientemente grande da essere rilevata, mentre l'immagine inflazionaria tradizionale del multiverso produce una curvatura negativa inferiore di molti ordini di grandezza a quanto possiamo sperare di misurare.

È interessante notare che la scoperta di una curvatura positiva falsificherebbe l'idea di multiverso, perché la teoria dell'inflazione afferma che gli universi bolla possono produrre solo una curvatura negativa. D'altro canto, se siamo fortunati potremo addirittura osservare in cielo segni evidenti di un multiverso, come il residuo di una «collisione» di universi bolla, che nell'immagine del multiverso quantistico interpretiamo come un segnale inviato verso di noi proveniente dall'orizzonte cosmologico. Ma gli scienziati sono tutt'altro che certi di poter rilevare segnali del genere.

Io e altri fisici stiamo approfondendo l'idea del multiverso quantistico a livello teorico. Ci sono domande fondamentali, tipo: come possiamo determinare lo stato quantistico dell'intero multiverso? Che cos'è il tempo e da dove emerge? L'ipotesi del multiverso quantistico non risponde immediatamente a queste domande, ma fornisce un quadro per affrontarle. Di recente, per esempio, ho constatato che i vincoli imposti dal requisito matematico per cui la nostra teoria deve includere probabilità definite rigorosamente, può permettere di determinare lo stato quantistico unico dell'intero multiverso. Questi vincoli suggeriscono inoltre che lo stato quantistico complessivo rimane costante anche se un osservatore fisico, che fa parte dello stato del multiverso, vedrà che si formano costantemente nuove bolle. Questo implica che il nostro senso dell'universo cambia nel corso del tempo e, anzi, il concetto stesso di tempo può essere un'illusione. Il tempo, secondo questa ipotesi, è un «concetto emergente» che sorge da una realtà più fondamentale, e sembra esistere solo in rami locali del multiverso.

Molte delle idee che ho trattato sono ancora abbastanza congetturali, ma è splendido che i progressi teorici permettano ai fisici di parlare di questioni così grandi e profonde. Chissà dove ci porteranno queste esplorazioni? Sembra però chiaro che viviamo in un'epoca avvincente, in cui le nostre indagini scientifiche vanno oltre quello che pensavamo essere l'intero mondo fisico, il nostro universo, verso un esterno potenzialmente illimitato. ■

PER APPROFONDIRE

Physical Theories, Eternal Inflation, and the Quantum Universe. Nomura Y., in «Journal of High Energy Physics», Vol. 2011, n. 11, articolo n. 063, novembre 2011. Preprint disponibile all'indirizzo web: **https://arxiv.org/abs/1104.2324.**

Multiverse Interpretation of Quantum Mechanics. Bousso R. e Susskind L., in «Physical Review D», Vol. 85, n. 4, articolo n. 045007, pubblicato on line il 6 febbraio 2012. Preprint disponibile all'indirizzo web: **https://arxiv.org/abs/1105.3796.**

I molti mondi di Hugh Everett. Byrne P., in «Le Scienze» n. 474, febbraio 2008.

Il terremoto del

Case e chiesa. Le macerie della basilica di San Benedetto a Norcia, distrutta dal terremoto di magnitudo 6.5 del 30 ottobre 2016. Gli edifici vicini, sebbene siano stati danneggiati, sono rimasti in piedi.

Giuseppe Bellini/Stringer/Getty Images

Un anno fa in un'area dell'Appennino centrale iniziava una sequenza sismica attiva ancora oggi e caratterizzata da un'evoluzione piuttosto imprevedibile

di Alessandro Amato e Daniela Pantosti

24 agosto 2016, ore 3.36 della notte.

Un terremoto di magnitudo 6.0 scuote il centro Italia. La faglia che lo genera si estende per oltre 20 chilometri lungo l'asse degli Appennini, a una profondità compresa tra 8 chilometri e la superficie, in una regione montuosa tra le più belle della nostra penisola. Un'area che ospita numerose cittadine storiche e centri minori di Lazio, Umbria, Abruzzo e Marche, abituate da secoli a convivere con i terremoti, anche più forti di quello appena avvenuto. Si tratta della fascia a più alta pericolosità sismica dell'Italia, che corre lungo tutta la dorsale appenninica, e che è sottoposta a tensioni geologiche continue.

Anche se non è uno dei più forti eventi sismici conosciuti dalle cronache storiche, l'impatto di quel singolo terremoto è tremendo. Nel Lazio, Amatrice e Accumoli patiscono i danni più gravi, stimati fino al X-XI grado MCS (la scala Mercalli-Cancani-Sieberg adottata comunemente per i rilievi macrosismici), con il bilancio più pesante in termini di vite umane. Nelle Marche, Arquata e Pescara del Tronto non sono da meno, con crolli totali di molti edifici e numerose vittime e feriti. Pur con alcuni centri collocati proprio sopra la faglia, l'Umbria sembra avere resistito meglio.

La faglia – nota ai geologi, cartografata e studiata da anni – è quella che corre lungo la parete ovest del Monte Vettore e prosegue verso sud-ovest in quella dei Monti della Laga. La parte che si affaccia sul Pian Grande di Castelluccio mostra i segni del terremoto anche in superficie, che da subito fanno discutere i geologi. Li mostra proprio accanto e in corrispondenza dello «specchio» di faglia evidente nelle carte geologiche e che è il risultato della ripetizione di molti terremoti come quelli dello scorso anno.

In sala sismica

La notte tra il 23 e il 24 agosto, quando ci siamo ritrovati nella sala sismica della sede romana dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV), non potevamo immaginare che fosse iniziata una delle sequenze sismiche più lunghe e complesse dell'ultimo secolo. Guardando i dati dei sismometri della Rete sismica nazionale non abbiamo compreso subito la tragedia. Il calcolo rapido della magnitudo Richter (ML) aveva fornito una stima di 6.0, ma qualche dubbio sulla grandezza del terremoto rimaneva, poiché la ML tende a sottostimare la grandezza reale dei forti terremoti. Invece il calcolo del cosiddetto «momento tensore» e della relativa magnitudo momento (Mw), che fornisce una stima più realistica della grandezza del terremoto, aveva confermato la stima di 6.0. Si trattava di un evento simile a quelli di Colfiorito, in Umbria, del 1997, 11 vittime tra i due terremoti della notte e della mattina del 26 settembre, e un po' più piccolo di quello del 2009 all'Aquila (309 vittime). Anche le caratteristiche dell'evento del 24 agosto erano analoghe a quelle dei terremoti precedenti: ipocentri a 8 chilometri di profondità, faglie estese fino alla superficie, movimento della faglia di tipo «diretto» (o «normale»).

Un terremoto di quella magnitudo non costituisce un problema per paesi in cui si è prestata un'attenzione continua al rischio sismico, in particolare alla riduzione della vulnerabilità degli edifici. Via via che si delineava il quadro scientifico dell'evento, credevamo e speravamo che i terremoti del 2009, del 1997, del 1984 e del 1979, che avevano già colpito quelle regioni, e i precedenti storici più antichi fossero serviti a ricordare e a prendere le contromisure adeguate, riducendo la vulnerabilità edilizia. Ci sbagliavamo. Nel Lazio il bilancio delle vittime si aggravava ora dopo ora. Alla fine saranno quasi le 300 persone decedute sotto le macerie.

Intanto le prime squadre di sismologi, geologi, tecnici erano all'opera già all'alba per migliorare le reti di monitoraggio e cercare le tracce del terremoto sul terreno. Una ricostruzione puntuale e tempestiva del sistema di faglie attivo è fondamentale per delineare un quadro dell'accaduto e per disegnare possibili scenari futuri: la sismicità si sta spostando in altre aree? Ci sono indizi di attivazione di altre faglie? Potrebbero esserci altri forti eventi su strutture vicine?

Alessandro Amato è geologo e dirigente di ricerca INGV. Ha diretto il Centro nazionale terremoti ed è stato membro della Commissione grandi rischi. Ha studiato molti terremoti italiani, la struttura di faglie e vulcani. Oggi dirige il Centro allerta tsunami INGV. Autore di *Sotto i nostri piedi* (Codice, 2016).

Daniela Pantosti, geologa, è direttore della Struttura terremoti dell'INGV. Si occupa di tettonica attiva, geologia del terremoto e paleosismologia. Ha studiato faglie attive in numerosi paesi del mondo, dal Mediterraneo al Medio Oriente, fino a California, Centro e Sud America.

Già dalle prime ore dopo la scossa principale, nella sala sismica si era raddoppiato il personale per stare dietro ai continui *aftershock* del terremoto. Con i soli dati della Rete sismica nazionale se ne localizzavano molte centinaia ogni giorno, in pratica uno ogni 2-3 minuti. In realtà erano molti di più, ma poiché avvenivano simultaneamente sulla superficie della faglia principale, circa 300 chilometri quadrati, e su altre faglie minori che si erano attivate, producevano segnali di fatto indistinguibili.

La zona attiva era quasi a metà strada tra i terremoti del 1997 e quelli del 2009. Sembrava che si stesse ricomponendo un puzzle. Un altro piccolo settore dell'Appennino si stava riassestando dopo avere accumulato energia per qualche secolo. I terremoti appenninici sono la risposta a un processo geologico lento che determina l'estensione della penisola dal Tirreno all'Adriatico. L'Italia peninsulare si allarga con una velocità di 3-4 millimetri all'anno, che vuol dire 3-4 metri ogni 1000 anni. Oltre a estendere la penisola, questi movimenti portano a un accumulo di stress sulle faglie dell'Appennino, che resistono a questa lenta tensione fino a quando l'attrito fra i due lembi della faglia lo consentono, poi devono cedere e rompersi, generando un terremoto. Le velocità massime di questa estensione sono osservate lungo l'asse della catena, ed è proprio qui che anche storicamente sono avvenuti i terremoti più intensi. Il concetto di ricarica lenta (periodo intersismico) e rilascio repentino di energia (terremoto), noto come «ciclo sismico», è alla base di molte ricerche mirate alla comprensione delle modalità con cui ogni faglia si prepara alla rottura; si cerca di individuare quali sono le faglie più pronte a generare un terremoto.

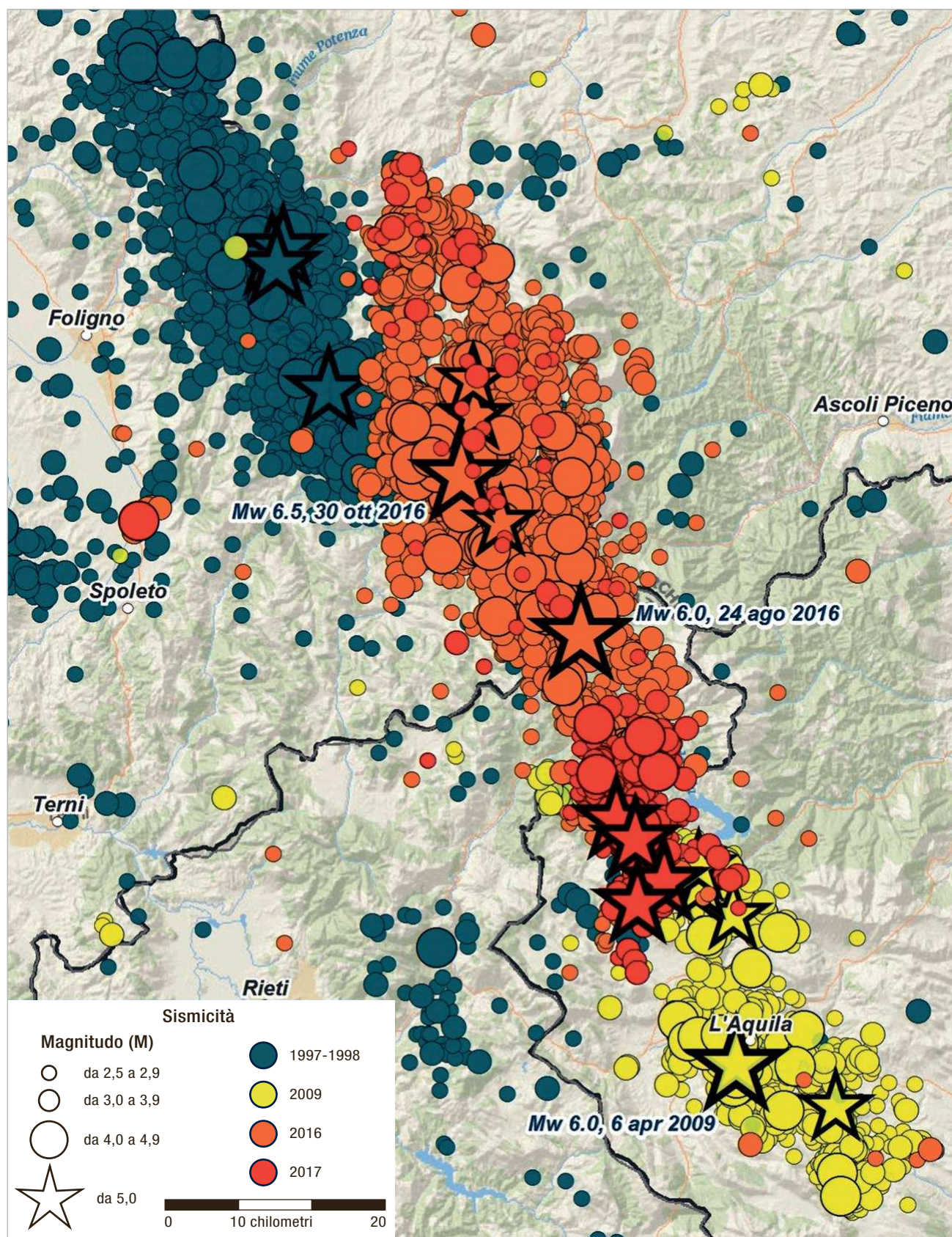
Proprio il concetto di ciclicità ha fatto nascere l'idea del «gap sismico», che descrive aree sismicamente silenti da secoli e circondate da zone dello stesso sistema sismogenetico interessate da forti terremoti in tempi recenti. In quest'ottica, il terremoto del 24 agosto sarebbe andato a colmare una parte di un gap sismico. Questo modello, se spiega a grande scala alcune caratteristiche della ricorrenza dei terremoti, in realtà è una semplificazione

IN BREVE

Il 24 agosto 2016 un forte sisma colpisce un'area tra Lazio, Umbria, Abruzzo e Marche, nella fascia a più alta pericolosità sismica dell'Italia.

La zona attiva era quasi a metà strada tra i terremoti del 1997 e del 2009, avvenuti sempre in Italia centrale. Un altro settore dell'Appennino si stava riassestando dopo avere accumulato energia per qualche secolo. Tra settembre e ottobre sembrava che la sequenza andasse verso un lento esaurimento.

Ma il 26 e 30 ottobre altri due forti terremoti scuotono sempre l'Italia centale, con epicentro nel pieno dell'area già colpita. A quasi un anno dall'inizio la sequenza è ancora alimentata con un centinaio di terremoti al giorno nell'area.

Resta il dubbio che lungo la dorsale montuosa attraverso Umbria, Marche, Lazio, Abruzzo siano rimaste zone che potrebbero attivarsi nei prossimi anni.

Cortesia Maurizio Pignone, INGV (*figura*)

Sequenza in mappa. La sequenza sismica iniziata il 24 agosto 2016 (*epicentri 2016 in arancione, in rosso del 2017*) è andata a colmare una zona a bassa sismicità (gap) localizzata tra le sequenze del 1997 a nord-ovest (*epicentri in blu*) e del 2009 a sud-est (*in giallo*).

estrema di un processo molto più complesso: sappiamo che le faglie interagiscono tra loro, che le loro caratteristiche possono variare nel tempo e possono modificarsi durante un terremoto, come mostra l'analisi dei grandi eventi sismici e gli esperimenti in laboratorio su campioni di roccia. Queste complessità sono le ragioni per cui al momento la scienza non è in grado di effettuare previsioni deterministiche a breve termine dei terremoti.

La scossa del 24 agosto era arrivata senza preavviso. Nessun *foreshock* era stato rilevato nei giorni, nelle ore o nei minuti prima del terremoto delle 3.36. Questa assenza di attività sismica prima della scossa principale era stata interpretata da alcuni come un fatto anomalo, perché era ancora viva la memoria del terremoto dell'Aquila del 2009. Quell'evento era stato preceduto da uno sciame sismico durato tre mesi e da due eventi di magnitudo tra 3 e 4 nelle ore prima dell'evento principale del 6 aprile alle 3.32. Ma la maggior parte dei forti terremoti non è preceduta da sciami, e la maggior parte degli sciami finisce senza sfociare in un forte evento. Questa differenza tra l'attacco del sisma del 2016 e quello del 2009 è ancora più sorprendente se si considerano le numerose analogie geologiche tra i due episodi. Se due eventi così simili si manifestano in modo così diverso, significa che i processi di preparazione al terremoto sono ineffabili, almeno dal punto di vista di chi osserva le cose da lontano, come i sismologi.

Complessità

Le sorprese dei terremoti del 2016 non si sono esaurite con quanto accaduto prima del 24 agosto. L'evoluzione della sequenza sismica ha avuto un andamento piuttosto imprevedibile.

Dopo il primo terremoto di magnitudo 6 del 24 agosto, la distribuzione degli epicentri ha subito delineato l'estensione della faglia. Poche ore dopo, i geologi hanno trovato sul terreno le tracce della faglia, poco a est dell'area epicentrale. Come dopo il terremoto dell'Aquila del 2009 e quello del 1997 a Colfiorito, ancora una volta l'intero strato crostale era stato tagliato dalla profondità di nucleazione del terremoto (8-10 chilometri) fino alla superficie, 1-2 chilometri sopra il livello del mare. Le tracce della frattura in superficie erano comunque di piccola entità rispetto allo spostamento della faglia in profondità: solo una ventina di centimetri sul terreno, per una lunghezza di poco più di 5 chilometri, mentre i dati indicavano spostamenti profondi sulla faglia di oltre un metro e una lunghezza della rottura di una ventina di chilometri.

La magnitudo di questi eventi, intorno a 6, è proprio la soglia al di sopra della quale le faglie iniziano a rompere la superficie.

La deformazione geologica, che si accumula lentamente e incessantemente a causa dello stiramento della penisola in direzione circa perpendicolare (da nord-est a sud-ovest) all'asse montuoso appenninico, non è rilasciata con un unico terremoto su una faglia lunga centinaia di chilometri (che potrebbe raggiungere o superare magnitudo 8), ma in maniera frammentata, su segmenti di faglia di lunghezza contenuta. Le prove geologiche, sismologiche e storiche rivelano che le faglie responsabili dei forti terremoti in Appennino hanno lunghezze comprese tra 20 e 40 chilometri, con terremoti di magnitudo tra 6 e 7. In questo modo i terremoti sono più piccoli ma più frequenti e, a causa della vulnerabilità edilizia del nostro paese, sono sufficienti per determinare danni ingenti. Lungo l'Appennino, dunque, si individuano segmenti di faglia che si susseguono in direzione da nord-ovest a sud-est lungo le zone più elevate della catena. Una delle sfide della sismologia è proprio la comprensione dei fattori che controllano l'estensione di questi segmenti di faglia, la magnitudo che possono generare, rompendosi individualmente o associandosi in una sorta di effetto «a cascata», e quanto siano stabili nel tempo; in altre parole, si ripetono con le stesse caratteristiche da un ciclo sismico al successivo?

Un controllo forte sulla segmentazione delle faglie è esercitato dalla struttura eterogenea delle rocce che costituiscono la crosta degli Appennini, una catena montuosa giovane e con una storia geologica complessa, che ha lasciato tracce importanti in profondità e in superficie. Le variazioni tridimensionali della struttura geologica sono determinate da contrasti litologici e reologici delle rocce che la compongono, e rispondono in maniera diversa alle deformazioni, influenzando la propagazione delle rotture in un terremoto, in qualche caso arrestandola, in altri accelerandola o facendola «saltare» su una faglia vicina.

Questa forte eterogeneità crostale è verosimilmente anche la ragione per cui nella nostra storia sismica sono così frequenti i casi di sequenze multiple, con più «eventi principali» che si manifestano a distanza di ore, giorni o mesi dal primo. Le immagini in profondità della distribuzione delle decine di migliaia di aftershock dopo le scosse principali del 2016 rivelano l'attivazione di numerose faglie, oltre a quella principale responsabile dei terremoti più forti. La coesistenza di più faglie attive a distanza ravvicinata è una caratteristica dell'Appennino e spiega perché sia difficile formulare previsioni su tempi di ritorno e magnitudo dei forti terremoti.

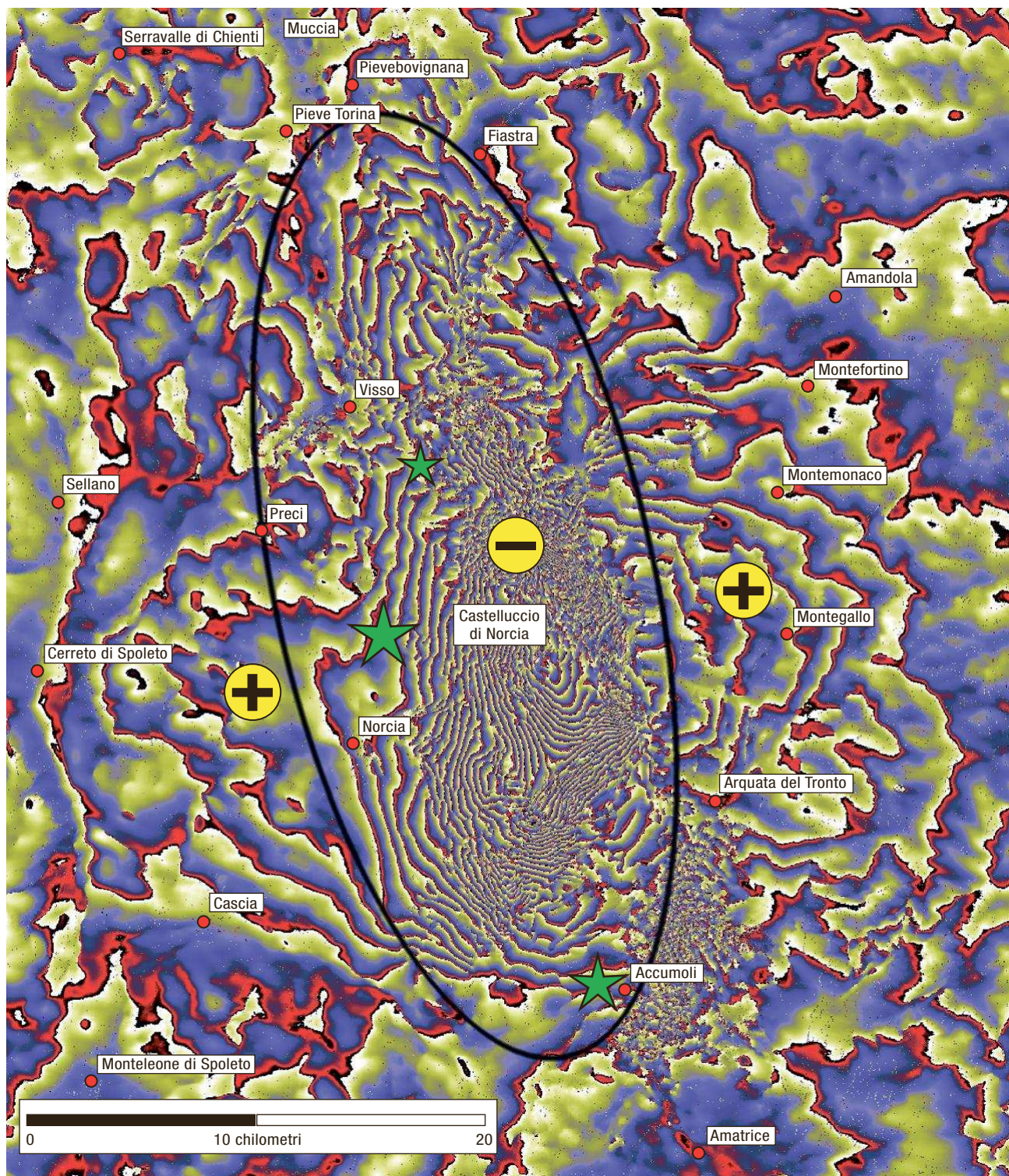
Le faglie interagiscono tra loro e hanno caratteristiche che possono variare nel tempo e in uno stesso terremoto

Dopo una fase intensa durata fino ai primi di settembre, con centinaia di aftershock al giorno, la situazione si era calmata nella seconda metà di settembre e per buona parte di ottobre. Sembrava che la sequenza andasse verso un lento esaurimento. Le esperienze dei terremoti recenti e storici, come nel 1703 nella stessa area dell'Appennino centrale, avevano tenuto alta l'attenzione e fatto adottare comportamenti cautelativi. L'attenzione alla comunicazione delle incertezze e dei rischi di sequenze multiple di eventi ha evitato che il disastro assumesse contorni ancora più drammatici. La Commissione grandi rischi aveva messo in guardia dalla possibilità di ulteriori forti scosse nelle aree a nord e a sud della zona attiva dal 24 agosto, per cui erano stati realizzati scenari di scuotimento e di danno.

La sera del 26 ottobre l'attività ha ripreso con due terremoti di magnitudo 5.4 e 5.9, che hanno causato ulteriori danni, ma non vittime, e fatto tornare la paura. L'area interessata si estendeva ormai per 50 chilometri sull'asse degli Appennini. L'area attiva si era spostata verso nord, tra Umbria e Marche. Vedevamo due faglie diverse, adiacenti, o due parti di una stessa zona di faglia che per qualche motivo, legato molto probabilmente alle eterogeneità della crosta, si erano mosse in due momenti diversi a distanza di due mesi. Molti parlavano di effetto domino, temendo l'ulteriore propagazione della sequenza verso nord, o verso sud.

Il 30 ottobre

La mattina del 30 ottobre, alle 7.40, milioni di abitanti delle regioni dell'Italia centrale hanno avvertito una nuova scossa: magnitudo 6.5, la più forte della sequenza e la maggiore in Italia dal terremoto del 1980 in Irpinia, di magnitudo 6.9. La posizione dell'epicentro, però, ha sorpreso tutti: 5 chilometri da Norcia, nel

Cortesia Stefano Salvi, INGV (*elaborazione*)

Deformazione dall'alto. Attraverso un interferogramma differenziale ottenuto da dati radar del satellite Sentinel-1, dell'Agenzia spaziale europea, l'INGV ha misurato con precisione la deformazione della superficie terrestre causata dai terremoti di Visso e Norcia del 26 e 30 ottobre 2016. Ogni frangia di colore rappresenta un movimento del terreno di circa 3 centimetri superiore alle frange adiacenti. Il verso del movimento del terreno è indicato dai simboli in giallo: il + indica un sollevamento e il – un abbassamento. L'ellissi indica la zona in cui si sono verificati i maggiori movimenti del terreno, più stretta a nord e più larga a sud, estesa per circa 40 chilometri in lunghezza e 15 in larghezza. Verso l'interno dell'elisse l'abbassamento della superficie aumenta fino a raggiungere, in prossimità del borgo di Castelluccio di Norcia, circa 70 centimetri sulla direzione verticale. Fuori dall'ellisse, a est e ovest, il terreno è stato sollevato di alcuni centimetri. Le stelle verdi mostrano i tre eventi maggiori della sequenza.

pieno dell'area già colpita. La faglia ricalcava, per circa 30 chilometri, quasi tutta l'area già attiva, a parte il settore meridionale, quello a sud di Amatrice. Le prove geologiche del terremoto erano eclatanti: le faglie del sistema Vettore-Bove mostravano spostamenti tra i due lembi della faglia di alcune decine di centimetri e in qualche settore superiori a due metri, coerenti con il quadro dei dati sismologici.

Fortunatamente, nessuna vittima ulteriore, né feriti, nonostante i nuovi crolli. Il sistema di protezione civile, dalla componente scientifica che analizza i dati e fa le sue valutazioni a chi sul territorio deve garantire la sicurezza dei cittadini, aveva funzionato.

Studiando la distribuzione delle migliaia di aftershock che delineavano il sistema di faglie, le forme delle onde sismiche registrate dai sismometri, le deformazioni della superficie identificate dai satelliti, i rilievi sul terreno, si è capito velocemente che cosa era successo: le faglie dei terremoti precedenti, quelli di agosto e di ottobre, non si erano attivate in maniera uniforme lungo la loro lunghezza da sud a nord, ma con una distribuzione a macchia di leopardo. Con i primi terremoti, alcune parti del sistema di faglie si erano spostate di oltre un metro, altre di pochi centimetri: restavano quindi molte aree in deficit di spostamento, e proprio lì il terremoto del 30 ottobre aveva insistito, colmando in parte queste zone deficitarie, in parte riprendendo e accrescendo il movimento di settori che si erano già spostati con gli eventi precedenti.

Il risultato è un puzzle di segmenti di faglia con spostamenti variabili. Ancora oggi non è chiaro se questo deficit dovrà essere colmato con altri terremoti o se ci siano processi elusivi che non siamo ancora in grado di quantificare e comprendere (per esempio scivolamenti asismici su parti della faglia) o ancora se il gap sia stato colmato. Allo stesso tempo, le modalità con cui questi eventi si sono succeduti ci danno un'opportunità eccezionale per capire come l'attività e le condizioni di stress su un piano di faglia possano controllare l'arresto, la propagazione o anche la ripresa di una rottura, elementi di grande importanza per valutare la magnitudo dei futuri terremoti e l'evoluzione di una sequenza sismica.

La sequenza è proseguita per molti mesi, e a quasi un anno dal suo inizio è ancora alimentata con un centinaio di terremoti localizzati ogni giorno nell'area. L'episodio più significativo, dopo quello di fine ottobre, è stato la serie di terremoti che hanno interessato il settore meridionale, quello verso l'Abruzzo, il 18 gennaio 2017, con quattro eventi di magnitudo tra 5 e 5.5 avvenuti nel giro di poche ore. Anche in questo caso è sembrato che questi terremoti avessero riempito l'ultima lacuna rimasta tra quelli del 2016 e quello del 2009 all'Aquila. La stessa area si era già attivata durante la sequenza del 2009, ma anche in quella circostanza con eventi di magnitudo poco superiore a 5. Se si somma l'energia rilasciata dai terremoti del 2009 e del 2016 in questo settore, non si arriva a quella di un evento di magnitudo 5.8, mentre sappiamo che nell'area ci sono faglie capaci di eventi ben più forti.

Resta quindi il dubbio che in tutta la regione dell'Appennino centrale attiva negli ultimi vent'anni – un'area estesa per oltre 120 chilometri lungo la dorsale montuosa attraverso Umbria, Marche, Lazio, Abruzzo – siano rimaste zone ancora cariche di energia elastica, che potrebbero attivarsi nei prossimi anni. Le ricerche sul campo e l'analisi dei dati proseguono per individuare e caratterizzare al meglio queste aree.

Amatrice e Norcia

Nel 1859 un terremoto di magnitudo di poco inferiore a 6 colpì la zona di Norcia. La città, che afferiva allo Stato Pontificio e contava quasi 5000 abitanti, subì gravi danni, con 101 vittime e decine di feriti. I danni furono causati dalle caratteristiche dell'edilizia locale. Le case avevano muri sottili costruiti con ciottoli di fiume slegati l'uno dall'altro, con cementi di pessima qualità; avevano inoltre volte pesanti costruite con gli stessi ciottoli, irregolari e senza legatura con i muri. Fu anche rilevato che le case più danneggiate erano le più recenti, erette senza seguire alcun metodo regolare di costruzione; che i due quartieri con i danni più gravi, sul pendio della collina, erano stati costruiti su grandi depositi di scarico e su rovine di edifici più antichi, con fondamenta irregolari. La commissione scientifica incaricata di eseguire rilievi propose nel 1860 una nuova legge edilizia, che fu subito adottata.

Ogni nuova costruzione doveva essere autorizzata da un'apposita commissione; era vietato costruire su terreni non idonei; i muri portanti delle case dovevano essere spessi almeno 60 centimetri e rinforzati con scarpate; gli edifici non dovevano superare i due piani, per un'altezza massima di 7,5 metri; dagli edifici esistenti di tre piani venne eliminato il terzo piano; fu vietato l'uso dei ciottoli di fiume per la muratura. Poco più di un anno dopo il terremoto, quando Norcia fu annessa al Regno d'Italia, la ricostruzione subì un'interruzione. Per questo motivo, e per l'indigenza delle persone rimaste senza casa, negli anni seguenti si registrarono vari episodi di trasgressione delle norme. Molti nursini, tornati nel loro paese in povertà, ripresero a costruire con materiali scadenti. Sembra comunque che la maggior parte degli edifici costruiti nel periodo post-sisma sia rimasta aderente alle prescrizioni, anche grazie a interventi successivi.

Oltre un secolo dopo, nel 1979, un altro terremoto della stes-

Cortesia Maurizio Pignone, Stefano Salvi, EMERGEO (*foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)

La faglia. Il sisma di magnitudo 6.5 del 30 ottobre 2016 ha rotto crosta dall'ipocentro alla superficie, producendo scarpate alte da decine di centimetri a oltre 2 metri; la fascia chiara era sepolta prima del sisma. Le rotture superficiali sono state rilevate per oltre 25 chilometri lungo il sistema di Faglia Vettore-Bove.

sa entità causò altri danni a Norcia. I successivi adeguamenti hanno contribuito a rinforzare il tessuto edilizio della cittadina umbra, come altri interventi eseguiti dopo i terremoti del 1997. Norcia, insomma, è arrivata preparata all'appuntamento con il terremoto del 2016. Anche l'evento maggiore della sequenza, quello del 30 ottobre, di magnitudo 6.5, con epicentro a soli 5 chilometri dalla città, non ha provocato crolli estesi nell'edilizia residenziale del centro storico, mentre hanno ceduto la basilica di San Benedetto e altre chiese, già compromesse dai terremoti di agosto e del 26 ottobre, e paradossalmente alcuni edifici recenti. Oggi nel centro storico di Norcia è quasi impossibile trovare un edificio con più di due piani (pian terreno compreso), a parte le chiese, il teatro e pochi altri. Alcuni sono stati danneggiati e sono inagibili, ma sono rimasti integri e hanno permesso alle persone di uscire di casa con le proprie gambe. Dopo meno di un anno, la città sta ripartendo.

Amatrice, al contrario, è distrutta e abbandonata; almeno lo è il centro storico, che costituiva il vanto del paese. Eppure in questa città della provincia di Rieti, meta turistica, non era sconosciuto il rischio di un forte terremoto. Il Comune di Amatrice era classificato come area sismica da oltre un secolo, dopo il terremoto della Marsica del 1915, quello che distrusse Avezzano. Dopo questo drammatico evento, vennero classificati i Comuni di tutto il territorio colpito e furono introdotte norme per la ricostruzione.

Se si confrontano le storie sismiche di Amatrice e Norcia non si trovano grandi differenze: entrambe hanno subito danni fino al IX e X grado Mercalli negli ultimi secoli, i maggiori dei quali prima dell'Ottocento. La differenza principale, forse decisiva, è che Norcia ha subito danni da eventi più recenti: quello già citato del 1859, VIII-IX grado Mercalli; quello del 1979, VIII grado. Ad Amatrice, invece, dopo gli eventi distruttivi del Seicento e del Settecento, si sono avuti solo quattro terremoti con effetti locali del VII grado tra il 1883 e il 1963, poi altri, tutti più piccoli. La ragione dei crolli sta principalmente nelle modalità costruttive delle due città: ad Amatrice non sono stati effettuati interventi di riduzione della vulnerabilità, come invece è stato fatto a Norcia nei due periodi post sisma dell'Ottocento e del Novecento. Le descrizioni dei palazzi crollati nel 1859 a Norcia sono simili a quelle viste nel 2016 ad Amatrice.

Le parole del Sindaco di Amatrice, Sergio Pirozzi, subito dopo il terremoto sono emblematiche: «Sappiamo che è una zona sismica, ci siamo abituati. Ma una cosa del genere da quando sto sulla faccia della Terra non è mai capitata». È vero, negli ultimi cinquant'anni Amatrice non aveva mai patito un evento del genere. Ma usare l'ultimo mezzo secolo come parametro di misura del rischio è sbagliato, ad Amatrice come in tutto il mondo. Per quello esistono le mappe di pericolosità, e non a caso Amatrice è nella fascia più alta, come molte altre città del centro-sud e non solo.

I terremoti che avvengono sulle grandi faglie appenniniche, come quelle attivatesi nella sequenza del 2016-2017, hanno periodi di ritorno di centinaia o migliaia di anni. Per questo motivo la maggior parte di noi non può averne memoria diretta. Gli studi storici rivelano però che un terremoto «gemello» di quello del 24 agosto 2016 era avvenuto quasi 400 anni fa, nel 1639. Analogamente gli studi paleosismologici avevano evidenziato che più di 800 anni fa un terremoto aveva dislocato la faglia del Vettore fino alla superficie, in modo simile a quanto è accaduto il 30 ottobre 2016. Emerge quindi l'importanza della memoria come strumento fondamentale per la riduzione del rischio sismico.

Oggi abbiamo nuovi metodi e tecnologie avanzate con cui osservare la terra dallo spazio e dal terreno, e caratterizzare così, dalla superficie alla profondità, le faglie che attraversano il nostro territorio. La sequenza sismica del 2016-2017 ha mostrato le potenzialità di questi strumenti per un monitoraggio dettagliato e tempestivo del processo sismogenetico. In un futuro non tanto lontano potremo seguire ancora meglio i fenomeni sismici in tempo reale, dai satelliti e dal terreno, magari anche dal sottosuolo. Nuovi dati stanno emergendo per caratterizzare sempre meglio la fase preparatoria dei terremoti, permettendoci di comprendere qualche elemento in più, aumentando così la nostra capacità predittiva. Nel frattempo, la priorità resta mettere in sicurezza gli edifici, cominciando da quelli delle aree più pericolose del paese. ■

PER APPROFONDIRE

The Amatrice Seismic Sequence: Preliminary Data and Results. Anzidei M. e Pondrelli S. (*a cura*), in «Annals of Geophysics», Vol. 59, Fast Track 5, 2016.

Paleoseismology of silent faults in the Central Apennines (Italy): the Mt. Vettore and Laga Mts. Faults. Galadini F. e Galli P., in «Annals of Geophysics», Vol. 46, n. 5, 2003.

The 2016 Central Italy Seismic Sequence: A First Look at the Mainshocks, Aftershocks, and Source Models. Chiaraluce L. e altri, in «Seismological Research Letters», Vol. 88, n. 3, 2017.

Coseismic Ruptures of the 24 August 2016, Mw 6.0 Amatrice Earthquake (central Italy). Pucci S. e altri, in «Geophysical Research Letters», Vol. 44, n .5, 2017.

L'effetto «anello con il diamante» appena prima e dopo la totalità mostra la luce dalla fotosfera solare che splende attraverso una valle sulla Luna.

ASTROFISICA

La prima eclissi totale di Sole che attraverserà gli Stati Uniti da costa a costa dopo 99 anni non è solo uno spettacolo da non perdere, ma è anche una preziosa occasione scientifica

di Jay M. Pasachoff

LA GRANDE ECLISSI DI SOLE *del 2017*

Jay M. Pasachoff è un astronomo del Williams College. È presidente del gruppo di lavoro sulle eclissi solari dell'Unione astronomica internazionale. Il suo lavoro è finanziato dalla National Geographic Society e dalla National Science Foundation.

Adoro stare all'aperto durante le eclissi solari e godermi l'universo che sembra rabbuiarsi tutt'attorno a me mentre le mie osservazioni vanno avanti. Un tempo suggerivo di costruirsi un proiettore con un forellino come obiettivo o addirittura di usare una normale grattugia per osservare questi eventi. Ma negli ultimi anni la disponibilità di filtri appositi per le eclissi a un dollaro o giù di lì ha reso obsoleti quei consigli. Adesso chiunque può guardare il Sole attraverso un filtro di questo tipo, a partire da più di un'ora prima della totalità, e vedere il morso che sembra allargarsi sul disco solare.

Negli ultimi minuti prima della totalità, noterete che la qualità della luce circostante cambia e diventa inquietante. Le ombre si affinano perché sono prodotte da una sottile mezzaluna di Sole anziché dal disco pieno. L'aria si raffredda e si solleva il vento. Sul suolo possono passare rapidamente fasce di ombra.

Quando manca solo qualche secondo e la Luna sta per occultare completamente il Sole, dalle valli sul bordo della Luna passano singoli raggi di luce, e del Sole rimane solo un arco di perle splendenti, che svaniscono via via, fin quando ne rimane solo una, così luminosa che sembra un diamante su un anello, magari con un bordo stretto e rossastro ai lati e una banda più chiara attorno alla sagoma della luna. Poi scompare anche il diamante. A quel punto possiamo abbassare il filtro, e faremmo bene a farlo, per guardare direttamente ciò che rimane del Sole: una regione della sua atmosfera che solitamente è nascosta dal cielo azzurro.

È la corona solare interna e media, quei pennacchi di plasma che volano via dalla superficie del Sole. È luminosa circa come la Luna piena – cioè, normalmente, un milione di volte più fioca del Sole – e altrettanto sicura da guardare a occhio nudo. Prima vedremo la corona come l'anello che portava il diamante, dopo la ammireremo in tutta la sua gloria: un alone bianco perlaceo di gas che arriva a un'estensione pari a varie volte il raggio del Sole. Se saremo fortunati, ci potrà capitare di vedere una potente eruzione di plasma verso lo spazio interplanetario.

Ma che senso ha che io cerchi di descrivere a parole un'eclissi totale di Sole? È uno spettacolo così commovente e meraviglioso che nessuno l'ha mai descritto in modo adeguato. Mi succede di continuo che qualcuno venga da me, dopo un'eclissi, a dirmi che sanno bene che avevo cercato di trasmettere l'emozione che avrebbero provato, ma che non ci ero andato nemmeno vicino. Televisori e monitor dei computer non le rendono giustizia. Le foto appiattiscono la gamma dinamica e perdono il contrasto abbagliante. Trovarsi all'aria aperta mentre l'universo apparentemente si oscura, prima gradualmente e poi di un fattore 10.000 in pochi secondi, è sconcertante. Rievoca le paure primordiali che il Sole venga portato via.

Ho visto la mia prima eclissi durante il primo anno di università, e mi ha affascinato. Da allora sono stato in tutto il mondo per assistere a 65 eclissi solari (di cui 33 totali). Non vedo l'ora di osservare la numero 66 il 21 agosto, quando il percorso della totalità attraverserà gli Stati Uniti dalla costa occidentale a quella orientale per la prima volta dal 1918.

E non seguo questi eventi solo per il piacere di farlo: le eclissi offrono agli scienziati che le osservano condizioni che le normali osservazioni non possono replicare. Sebbene si possano dotare i telescopi terrestri di un piccolo cono o disco metallico per eliminare il Sole a piacimento, ottenendo un cosiddetto coronografo, le loro eclissi artificiali non sono all'altezza di quelle reali. Le molecole dell'aria lasciano il cielo troppo azzurro e luminoso, anche da siti di montagna alti e incontaminati. E i coronografi spaziali devono coprire non solo il disco solare che osserviamo quotidianamente, ma una larga banda tutt'intorno, altrimenti all'interno dello strumento si diffonde troppa luce. Inoltre, ogni telescopio ha una risoluzione limitata e «spalma» un po' la luce che vi entra. Le eclissi naturali non hanno questo problema, perché il «telescopio» è composto, di fatto, dall'intero sistema Terra-Luna, con una risoluzione eccezionalmente elevata. Uniamo le nostre osservazioni dal suolo con quelle dai veicoli spaziali per ottenere un'immagine completa del Sole. Solo all'ombra fresca della Luna riusciamo a osservare la luce visibile emessa dalla parte interna e mediana della corona.

È in queste distese interne che cerchiamo una risposta a uno dei più insidiosi enigmi dell'astrofisica: perché la temperatura del Sole aumenta allontanandosi dalla sua superficie? Di solito le cose si raffreddano mentre si allontanano da un oggetto caldo, come un falò o un termosifone. All'interno del Sole la temperatura parte da 15 milioni di gradi Celsius al centro e scende uniformemente via via che si va verso l'esterno, fino ai 5500 della fotosfe-

IN BREVE

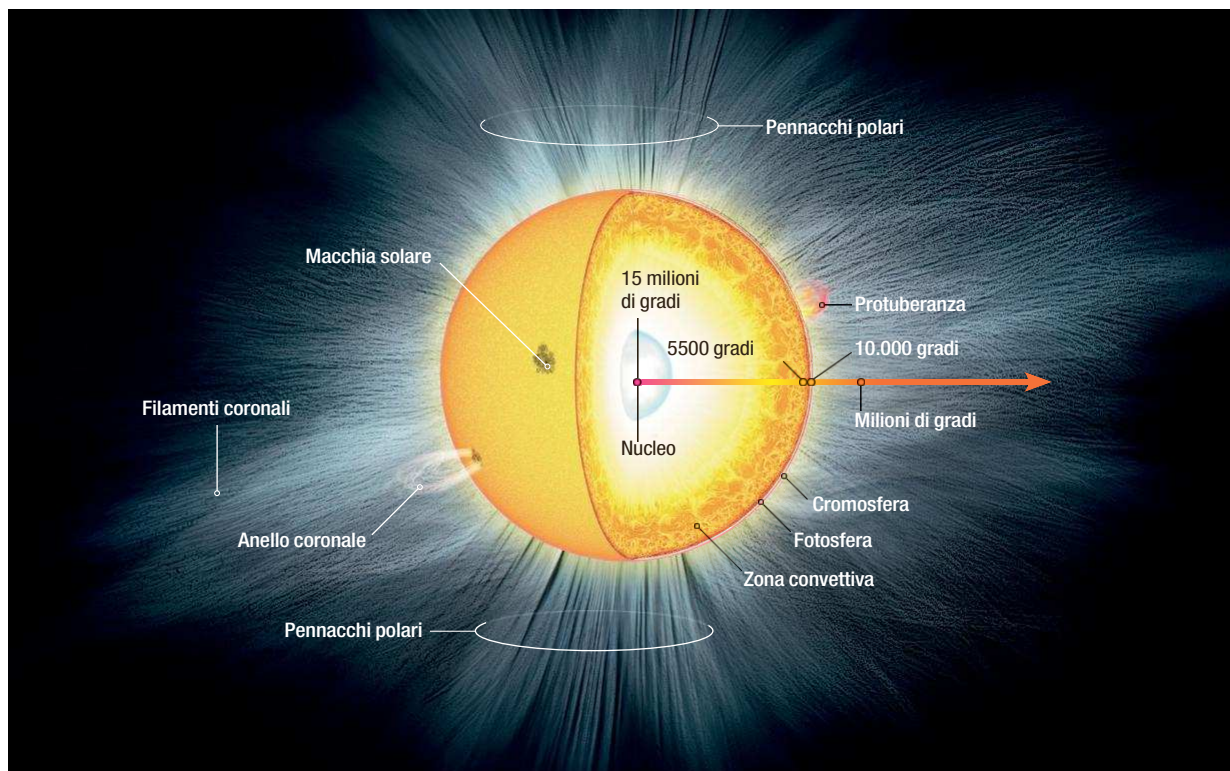
Il 21 agosto gli statunitensi in uno stretto percorso dall'Oregon al South Carolina potranno godersi un'eclissi totale di Sole.

L'eclissi è un'occasione rara per studiare il Sole in condizioni impossibili in altri momenti.

Si cercherà di rispondere a misteri di lunga data come il modo in cui il campo magnetico del Sole forma la corona solare, come mai la corona è così calda e altro ancora.

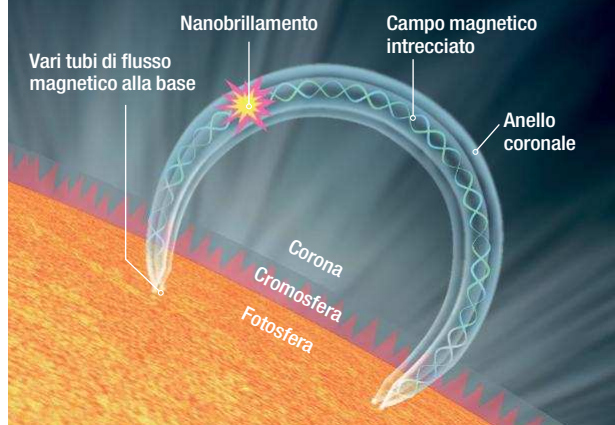
Jay M. Pasacho/Getty Images (*pagine precedenti*)

Il Sole in ombra

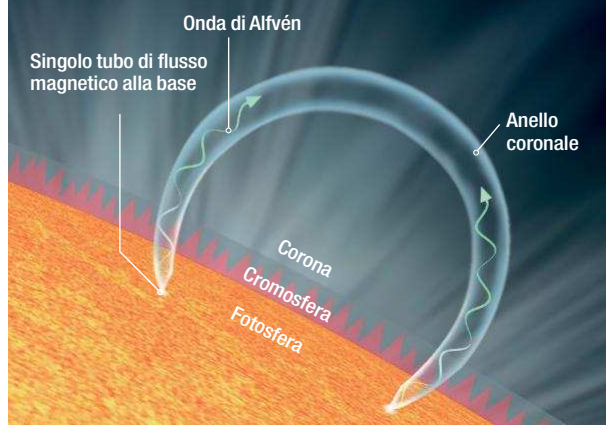
Osservare il Sole durante un'eclissi solare, quando la sua faccia è coperta dalla sagoma della Luna, permette agli astronomi di studiare strati dell'atmosfera solare che sono altrimenti impossibili da riprendere. La corona solare è un alone di gas che emerge dalla superficie del Sole in pennacchi e anelli. Le osservazioni durante l'eclissi potrebbero aiutare a risolvere il mistero del motivo per cui la corona è più calda della superficie del Sole.

Due ipotesi: brillamenti oppure onde

Gli scienziati hanno proposto due classi generali di idee per spiegare da dove la corona solare prende il suo calore. Studiando la corona durante le eclissi e misurando la velocità a cui oscilla il gas coronale, i ricercatori sperano di distinguere tra le due idee o forse di capire che si verificano entrambi i processi.

Ipotesi dei nanobrillamenti

Secondo un modello di riscaldamento, milioni di minuscole esplosioni chiamate nanobrillamenti potrebbero combinarsi per riscaldare la corona. Queste esplosioni potrebbero essere attivate quando diversi filamenti del campo magnetico coronale (chiamati tubi di flusso) si incrociano e si riconnettono liberando energia.

Ipotesi dell'onda magnetica

Un'altra possibilità è che le onde magnetiche, chiamate onde di Alfvén, si propaghino attraverso gli anelli coronali. Provenienti da entrambe le basi dell'anello, queste onde possono interagire tra loro e dissipare parte della loro energia, sia nelle estremità inferiori dell'anello sia attraverso la corona.

Illustrazione di Don Dixon

ra solare, la superficie che emette la luce del Sole nello spazio. Ma a quel punto la tendenza si inverte. Il tenue gas appena sopra la superficie visibile risale fino a oltre 10.000 gradi, e poi balza bruscamente a milioni di gradi. Gli scienziati si chiedono tuttora come accada.

Abbiamo fatto enormi passi avanti, riguardo sia alle osservazioni sia alla teoria, da quando per la prima volta ho descritto gli aspetti scientifici della corona solare su «Scientific American» nel 1973 [su «Le Scienze» nel 1974, N.d.R.] Adesso una flotta di sonde monitora il Sole nelle frequenze dell'ultravioletto e dei raggi X, che non possiamo vedere dalla Terra, e sono stati sviluppati strumenti sofisticati per collegare tutte le osservazioni. Abbiamo un'idea generale per la soluzione del problema del riscaldamento della corona – ha a che fare con il campo magnetico del Sole – ma i dettagli rimangono poco chiari. E questo non è certo l'unico problema che ci presenta la corona. Le osservazioni durante l'eclissi imminente dovrebbero aiutare ad affrontare queste domande.

Il paesaggio solare

Gli scienziati sanno già molto della corona solare. Da un certo punto di vista sembra un gigantesco porcospino. Si prolunga in sottili filamenti, alcuni dei quali sono più larghi alla base e formano una guglia a quote elevate, come elmi a punta. La forma che assumono varia con il ciclo delle macchie solari.

Quando le macchie proliferano, come negli anni dal 2012 al 2014, questi filamenti emergono anche da latitudini che arrivano ai 30 gradi nord e sud, cosicché la corona appare a tutto tondo. Durante i periodi di minimo delle macchie, come quello in cui ci troviamo, la corona è più piatta e si osservano solo filamenti limitati alle regioni più vicine all'equatore del Sole e pennacchi coronali, sottili e dritti, che appaiono ai poli. Dalle regioni vuote comprese tra i filamenti sfugge all'esterno, verso il sistema solare, un flusso di particelle cariche detto vento solare, che procede a centinaia di chilometri al secondo, anche il doppio della velocità del vento solare che esce da altre regioni. Alla base della corona, ancorati alla fotosfera solare, ci sono piccoli anelli di gas, forse costituiti da fili multipli troppo sottili perché le nostre osservazioni attuali possano distinguerli. Questi anelli coronali possono pulsare, con onde che li percorrono o li attraversano avanti e indietro.

Tutti questi delicati dettagli sono prodotti dal campo magnetico solare, generato dal gas ribollente nelle profondità del Sole. Ciò che però non si sa è come di preciso la dinamica del campo magnetico sia responsabile della temperatura sorprendentemente alta della corona. Sappiamo che il responsabile è il campo magnetico, perché i fenomeni magnetici non sono soggetti alle stesse restrizioni termodinamiche che impedirebbero all'energia di fluire per conduzione termica dalla superficie calda alla corona ancora più calda.

Esplosioni oppure onde?

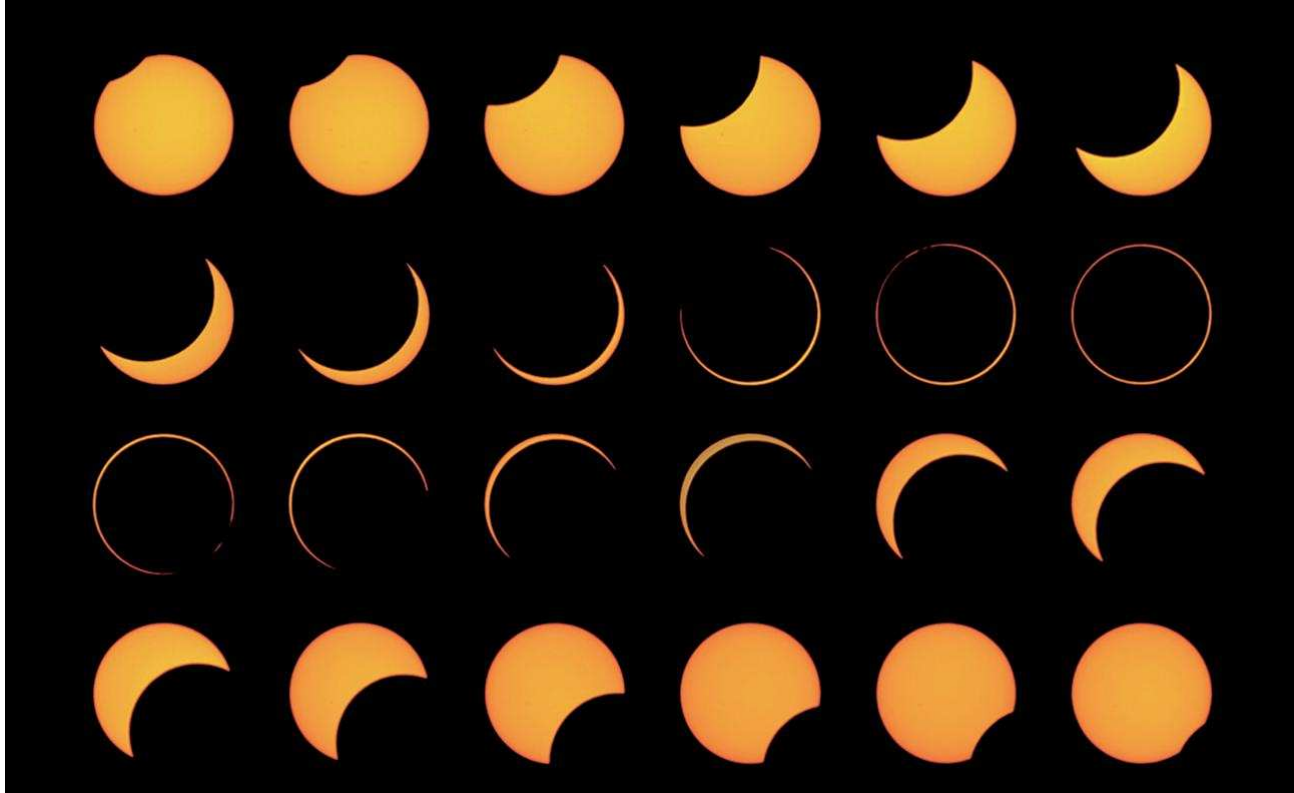
Ci sono due ipotesi principali sul modo in cui il campo magnetico del Sole possa trasferire parte della propria energia nella corona per riscaldarla. Una possibilità è che avvenga attraverso piccolissimi brillamenti solari. Queste esplosioni si verificano quando il campo magnetico subisce una brusca variazione della sua configurazione, nel giro di pochi secondi. Se seguiamo la struttura del campo alla superficie del Sole osserviamo che occasionalmente le polarità nord e sud nelle regioni delle macchie solari si ritrovano confuse. Questa situazione sottopone il campo magnetico a enormi sollecitazioni e, per alleviarle, le due polarità si collegano all'improvviso in modo nuovo, emettendo quantità immani di energia immagazzinata. Queste riconnessioni riscaldano localmente la corona fino a 10 milioni di gradi e più, emettono un lampo luminosissimo e talvolta espellono plasma nello spazio. I brillamenti possono danneggiare i satelliti in orbita attorno alla Terra e potrebbero costituire un grave rischio per gli astronauti diretti su Marte.

I brillamenti che osserviamo sono troppo intermittenti per spiegare la temperatura di base dell'atmosfera solare, ma è possibile che esplosioni troppo piccole per essere individuate singolarmente investano la corona? James Klimchuk, del Goddard Space Flight Center della NASA, sostiene con forza l'idea di questi nanobrillamenti. Milioni di piccole esplosioni in corso nella corona ogni secondo, ognuna con un miliardesimo dell'energia di un grande brillamento, la manterrebbero a temperatura elevatissima.

Milioni di piccole esplosioni in corso nella corona ogni secondo, ognuna con un miliardesimo dell'energia di un grande brillamento, la manterrebbero a temperatura elevatissima

Il principale insieme di teorie in competizione è quello secondo cui sarebbero le oscillazioni del campo magnetico a riscaldare la corona. Gli anelli vibranti della parte inferiore della corona scuoterebbero il gas circostante, aumentandone la temperatura. Queste onde potrebbero assumere varie forme. Gli scienziati hanno escluso le onde sonore, trasportate dalla pressione del gas, ma le onde di Alfvén, guidate dal magnetismo, o un ibrido delle due, le cosiddette onde magnetoacustiche, sarebbero possibili. Onde magnetiche di qualche tipo potrebbero essere sufficienti per aumentare la temperatura coronale fino a milioni di gradi?

In linea di principio dovrebbe essere possibile distinguere tra i nanobrillamenti e i meccanismi ondulatori misurando le oscillazioni del gas coronale. Fluttuazioni con periodi da circa dieci secondi a qualche minuto rivelerebbero il passaggio delle onde di Alfvén standard lungo gli anelli coronali. L'osservazione delle vibrazioni della superficie solare mediante una tecnica detta eliosismologia fa ritenere che il Sole sia in grado di innescare onde del genere. Sebbene le sue oscillazioni più intense si verifichino con un periodo relativamente tranquillo, di circa cinque minuti, questo è solo un tipo tra le molte ondulazioni sperimentate dalla superficie.

Le osservazioni durante un'eclissi potrebbero essere cruciali per misurare le fluttuazioni nei cicli coronali. I vantaggi logistici dell'osservazione dalla Terra permettono di usare apparecchiature con una risoluzione temporale più elevata rispetto a quella esistente su qualsiasi strumento spaziale attuale. La mia squadra usa dispositivi ad accoppiamento di carica (CCD) che catturano le immagini numerose volte al secondo. Come confronto si considerino le telecamere dell'Atmospheric Imaging Assembly sul Solar Dynamics Observatory (SDO) della NASA, che catturano osservazioni attraverso vari dei loro dieci filtri una volta ogni 12 secondi, e il Solar Ultraviolet Imager del nuovo Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-16), che per i suoi sei filtri raggiunge al massimo una frequenza di una volta ogni dieci secondi.

Sequenza di immagini dall'eclissi anulare di febbraio 2017, fotografata dall'autore nella regione della Patagonia, in Argentina.

Jay M. Pasachoff (*fotografie*); Christian Lockwood Williams College (*composizione*)

Quello che abbiamo scoperto finora estende quanto si credeva possibile. Alcune oscillazioni potrebbero avere periodi più brevi di un secondo, corrispondenti a una previsione teorica di una speciale modalità di onde di Alfvén che percorrono la superficie degli anelli anziché l'interno. Ma i nostri dati sono scarsi: solo pochi minuti di simili osservazioni ad alta frequenza durante due precedenti eclissi totali. Quest'anno useremo la nostra complessa apparecchiatura CCD, con filtri di colore incredibilmente puro, per isolare il caldo gas coronale, nuovamente in cerca dello spettro temporale delle onde. Speriamo che i nostri risultati aiutino i ricercatori a scegliere tra le diverse teorie sul riscaldamento coronale o addirittura portarli a concludere che operano diversi meccanismi simultaneamente. Nelle regioni attive sopra le macchie solari ci sono condizioni positive per i brillamenti, e le onde sono relativamente deboli. Nelle regioni tranquille, invece, potremmo avere onde su piccoli anelli o milioni di milioni di nanobrillamenti ininterrottamente.

Tattica per le eclissi

Sono stati messi a punto alcuni trucchi per sfruttare al meglio le eccezionali opportunità offerte dalle eclissi. Osservarle ci permette di esaminare la forma della corona in alta risoluzione spaziale e temporale. Le nostre immagini di eclissi ottenute da terra sono almeno otto volte più dettagliate in ogni dimensione rispetto alle migliori coronagrafie spaziali. Le eclissi hanno l'inconveniente di essere brevi e occasionali, ma compensiamo mettendo insieme i dati da eclissi distinte e da siti diversi durante una stessa eclissi.

Per esempio, osservando le eclissi nel corso di un intero ciclo di attività solare di 11 anni, seguiamo i cambiamenti del grado di rotondità della corona, che corrisponde alla distribuzione dei filamenti a varie latitudini, e li confrontiamo con altre misurazioni dell'attività solare. Per questi studi collaboro con l'astronomo Vojtech Rušin, dell'Accademia delle scienze slovacca. Sebbene da uno specifico sito durante un'eclissi la corona sia visibile solo per pochi minuti, possiamo combinare osservazioni da più siti per determinare i cambiamenti dei filamenti e dei pennacchi coronali nel corso delle ore impiegate dall'ombra della Luna per attraversare la Terra. Durante l'eclissi del 21 agosto potremo anche ottenere osservazioni ininterrotte, da costa a costa degli Stati Uniti, grazie alle osservazioni dei *citizen scientist*, i cittadini scienziati.

Un ulteriore motivo per combinare molteplici immagini di un'eclissi consiste nel catturare l'enorme gamma di luminosità della corona. Dalle singole immagini acquisite in molte esposizioni possiamo individuare le parti esposte correttamente e metterne insieme una decina per volta. L'esperto ampiamente riconosciuto di queste elaborazioni al computer è Miloslav Druckmüller, un informatico del Politecnico di Brno, nella Repubblica Ceca. Dato che la corona è circa 1000 volte più luminosa appena fuori dal bordo del Sole di quanto sia appena un raggio solare più all'esterno, bisogna selezionare le parti meglio esposte da decine di immagini diverse e riunirle. Utilizzando queste immagini composite ottenute dalle ultime eclissi totali – le più recenti delle quali si sono osservate dall'Indonesia, dalle Svalbard, dal Gabon, dall'Australia e altrove – la mia squadra ha misurato la velocità dei filamenti coronali, dei pennacchi polari e delle espulsioni di massa. Speriamo di arricchire notevolmente queste osservazioni in agosto.

Un altro trucco è sfruttare la graduale invasione del Sole da parte della sagoma della Luna nel corso di un'eclissi. Via via che le macchie solari vengono coperte o scoperte dal bordo della Luna, i telescopi possono osservare bruschi cambiamenti della luminosità del Sole, permettendo di individuare i dettagli. Quest'anno, per ottenere la risoluzione spaziale più alta possibile, la mia squadra sta collaborando con Dale Gary, del New Jersey Institute of Technology, Tim Bastian, del National Radio Astronomy Observatory, e Tom Kuiper, del Jet Propulsion Laboratory della NASA, per usare radiotelescopi in modo da misurare i cambiamenti nelle emissioni radio da eventuali macchie solari attive che possano essere visibili a varie frequenze quando la luna copre il Sole.

Anche se questi telescopi sono al di fuori del percorso della totalità, ognuno di essi vedrà coperto circa il 70 per cento del disco solare. Otterremo le osservazioni radio con la risoluzione più alta dall'Expanded Owens Valley Solar Array in California, con i suoi 13 radiotelescopi collegati tra loro che rileveranno osservazioni continue del Sole a centinaia di frequenze da 2,5 a 18 gigahertz. Le immagini a risoluzione inferiore ottenute dal Goldstone Apple Valley Radio Telescope, anch'esso in California, miglioreranno la qualità dell'immagine aggiungendo lo sfondo. Dovremmo essere in grado di abbinare le posizioni esatte dei luminosi anelli coronali, osservati a queste lunghezze d'onda radio, con i punti che si illuminano nell'ultravioletto o nei raggi X osservati dalle sonde, capendo così come si riscaldano gli anelli.

Il campo magnetico della fotosfera è ben studiato, ma quella della corona molto meno. Per rimediare a questo problema, Ed DeLuca, dello Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, e Jenna Samra, dottoranda ad Harvard, in collaborazione con Leon Golub, dello Harvard-Smithsonian Center, e Philip Judge, dello High Altitude Observatory presso il National Center for Atmospheric Research (NCAR) a Boulder, in Colorado, prevedono di seguire l'eclissi da un aereo Gulfstream V del NCAR. Dal loro punto di osservazione al di sopra del grosso dell'atmosfera che assorbe gli infrarossi potranno misurare l'intensità delle linee spettrali a infrarossi, sperando di individuarne alcune che sono magneticamente sensibili.

Un esperimento insolito che verrà effettuato ad agosto riguarderà una verifica della relatività generale simile a quella fatta da Arthur Eddington nel 1919

Se avranno successo, intendono volare di nuovo nel corso di un'eclissi successiva, usando filtri di polarizzazione per misurare il campo magnetico coronale. Separando le onde luminose con orientamenti diversi, le misurazioni di polarizzazione ci aiutano a individuare le diverse componenti della corona. L'interno della parte centrale della corona che vediamo a occhio nudo durante un'eclissi totale è formato da gas altamente ionizzato che diffonde verso di noi la luce solare ordinaria. Questa diffusione polarizza la luce, e il moto degli elettroni provocato da questo processo offusca le linee scure che altrimenti penetrerebbero nello spettro della luce del Sole.

Nella parte più esterna della corona, più vicino all'orbita di Mercurio, la polvere nello spazio interplanetario fa rimbalzare la luce verso di noi ma non la polarizza, né altera lo spettro solare ordinario. Anche altri ricercatori si preparano a studiare la polarizzazione in occasione dell'eclissi di quest'anno, fra cui Nat Gopalswamy, del Goddard Space Flight Center della NASA, Judge e Steven Tomczyk, entrambi dello High Altitude Observatory, e Padma Yanamandra-Fisher, dello Space Science Institute. Nel 2018, quando il telescopio solare Daniel K. Inouye, in corso di costruzione a Maui, inizierà le osservazioni, uno dei suoi strumenti dovrebbe essere in grado di misurare direttamente il campo magnetico coronale studiando la polarizzazione delle linee spettrali a infrarossi. E quando, sempre nel 2018, verrà lanciata la Parker Solar Probe della NASA, volerà attraverso la corona solare e contribuirà a svelare le incertezze nel riscaldamento coronale.

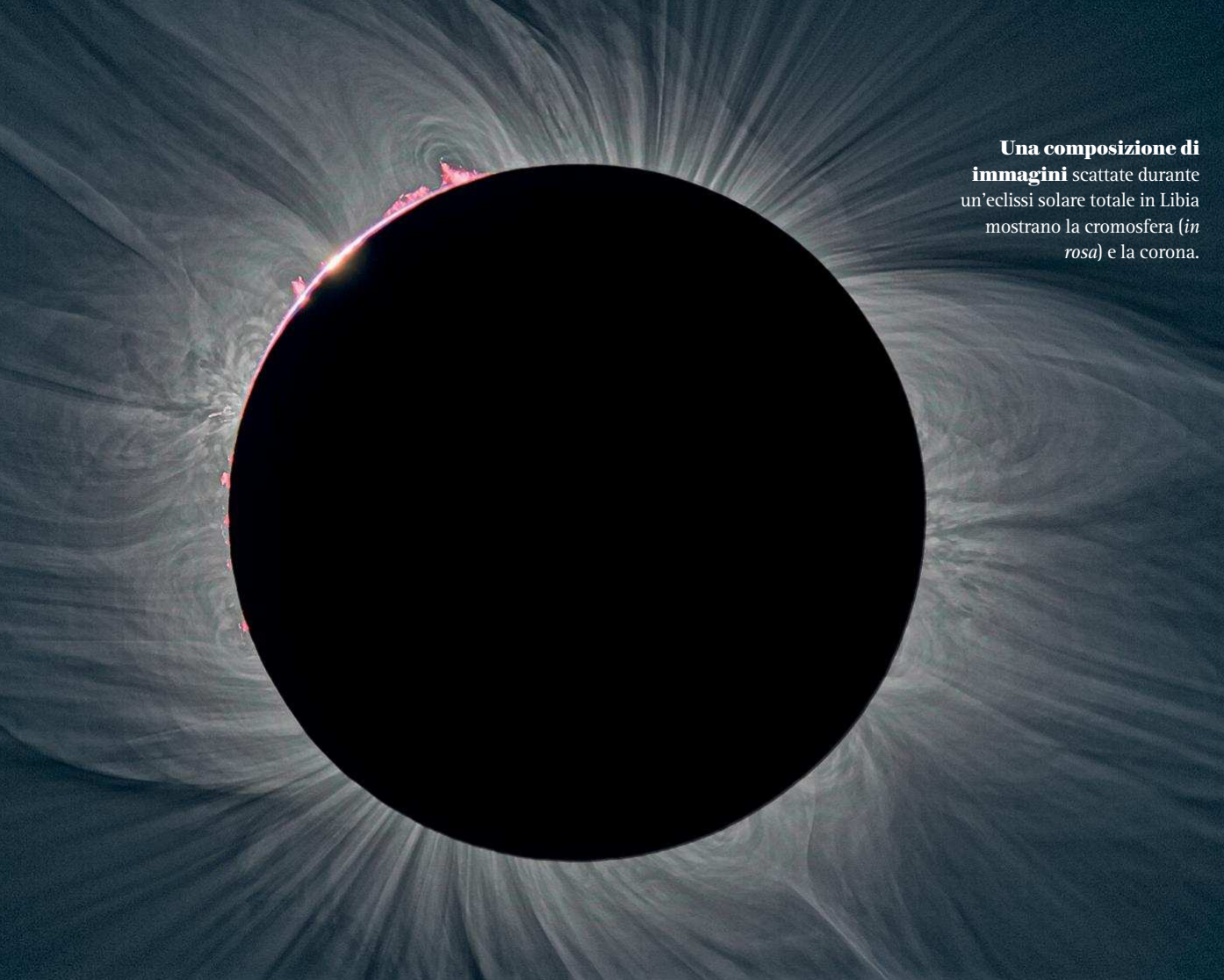
Una collaborazione mondiale

Nel complesso il lavoro per osservare questa eclissi sarà veramente enorme: qui l'ho appena accennato. La NASA ha finanziato 11 proposte, sei per gli studi sulla corona e cinque sulla reazione dell'atmosfera terrestre al significativo raffreddamento provocato dall'eclissi, argomento su cui ho lavorato con Marcos Peñaloza-Murillo, dell'Universidad de los Andes, in Venezuela. Un altro importante gruppo di ricerca statunitense che usa le eclissi per studiare la corona è diretto da Shadia Habbal, dell'Institute for Astronomy dell'Università delle Hawaii. I suoi collaboratori, da lei battezzati Solar Wind Sherpas, riprenderanno la corona attraverso filtri scelti per osservare plasmi di diverse temperature. Il nuovo finanziamento NASA ottenuto da Habbal permette un miglioramento dello spettrografo di *imaging* a doppio canale di recente concezione del gruppo, che è stato sperimentato con successo nel 2015. Diverse osservazioni da terra e dallo spazio forniranno lo studio più completo di tutti i tempi della corona infrarossa, del suo spettro e della sua polarizzazione.

Il mio gruppo si è avvalso di collaborazioni internazionali durante le 33 eclissi totali, che ho osservato da siti in tutto il mondo. Ora è giunto il momento di ricambiare l'ospitalità. Ci aspettiamo che le riprese ad alta risoluzione e le analisi di Serge Koutchmy, dell'Institut d'Astrophysique di Parigi, e dei suoi collaboratori contribuiscano allo studio dell'eclissi di agosto. Nei siti della mia squadra ci saranno i nostri colleghi provenienti da Austria, Slovacchia, Grecia, Giappone, Cina, Iran e altrove.

Anche i citizen scientist avranno molte opportunità per dare un contributo al lavoro dei ricercatori. Sono coinvolto nell'Eclipse Megamovie Project, che si deve allo Space Sciences Laboratory dell'Università della California a Berkeley, ed è diretto da Laura Peticolas. Chi vorrà potrà, tramite un'interfaccia di Google, inviare video e immagini che verranno archiviati e assemblati in filmati che abbracceranno l'intero continente e saranno disponibili a tutti gli interessati, che potranno vederli e analizzarli. In uno spirito simile, Matt Penn, del National Solar Observatory, ha organizzato l'esperimento Citizen Continental-America Telescopic Eclipse (Citizen CATE), una collaborazione su scala continentale di circa 70 siti con piccoli telescopi identici e rilevatori CCD.

Un esperimento insolito che verrà effettuato ad agosto non ha nulla a che fare con la corona, che anzi ci sarà d'impiccio. Come è noto, nel corso di un'eclissi del 1919 Arthur Eddington verificò la teoria generale della relatività di Einstein. Cercò le prove del fatto che la massa del Sole devia la luce di stelle lontane dietro di esso, fenomeno che in realtà è provocato dalla distorsione relativistica dello spazio-tempo. Da decenni dico a tutti che abbiamo cose più importanti da fare, durante un'eclissi totale, che ripetere questo esperimento. Dopo tutto, al giorno d'oggi i fisici hanno metodi più precisi per verificare la teoria della relatività. Ma in realtà, in occasione dell'eclissi di quest'anno, le nuove capacità di osservazione possono rendere questa indagine utile, o almeno interessante.

Il fisico emerito californiano Don Bruns svolgerà osservazioni di questo tipo, grazie a un progetto complesso per calibrare il suo telescopio misurando molte immagini notturne di stelle. Un tentativo precedente di usare le osservazioni ottenute con reflex digitali a lente singola, nel corso dell'eclissi del 2006, da parte del belga Jean-Luc Dighaye, alla cui analisi abbiamo contribuito io e Carlton Pennypacker, dell'Università della California a Berkeley e del Lawrence Berkeley National Laboratory, è fallito, ma era stato effettuato con i pixel grandi delle reflex commerciali. Speriamo che pixel più piccoli e la calibrazione precisa di un rilevatore astro-

Una composizione di immagini scattate durante un'eclissi solare totale in Libia mostrano la cromosfera (*in rosa*) e la corona.

nomico CCD avranno successo. Bradley Schaefer, della Louisiana State University, ritiene che gli apparecchi moderni abbiano risoluzione e sensibilità sufficienti per superare la precisione delle verifiche svolte in passato, e cercherà di osservare il fenomeno. Grazie a un catalogo appena pubblicato dall'Agenzia spaziale europea, realizzato con il satellite Gaia, ora conosciamo le posizioni delle stelle con estrema precisione, e così possiamo cercare eventuali deflessioni causate dal Sole con meno calibrazioni del telescopio.

Qui vicino

L'eclissi del 21 agosto comincerà all'alba nell'Oceano Pacifico. La totalità avrà inizio sulla terraferma statunitense in Oregon, con fasi parziali visibili in tutti gli Stati Uniti, in Canada, Messico e Sud America. Dopo aver lasciato il South Carolina vicino a Charleston, circa 90 minuti più tardi, l'eclissi totale finirà al tramonto sull'Atlantico, con fasi parziali visibili dall'Africa nord-occidentale e dall'Europa occidentale. Se le condizioni del tempo saranno favorevoli, scienziati e grande pubblico rimarranno senza parole. Unendo i risultati dell'eclissi rilevati a terra con le osservazioni provenienti dai satelliti nelle sezioni visibile, ultravioletta, raggi X e radio dello spettro si avrà la visione più completa mai vista dell'atmosfera solare.

Tutto quello che capiremo del Sole si applicherà anche ai miliardi e miliardi di stelle simili al Sole che non possiamo vedere altrettanto dettagliatamente. Può stupire questa scarsa completezza di ciò che sappiamo del Sole, il più studiato degli oggetti celesti. Ma secondo me i dubbi che ancora rimangono sono una meravigliosa scusa per vivere insieme una delle più grandi esperienze della natura.

Quanto a me, decenni fa durante la totalità ero così intento a scattare fotografie che avevo a stento il tempo di alzare lo sguardo. Ma adesso, grazie agli strumenti automatizzati, posso prendermi qualche secondo per assaporare l'eclissi mentre le fotocamere scattano e i sensori elettronici caricano i loro dati sui computer. Non vedo l'ora di ammirare dall'Oregon la mia sessantaseiesima eclissi solare. Chi ne è affascinato come me può già pregustare le eclissi del 2019 e del 2020 in Cile e in Argentina e l'eclissi totale del 2024 che attraverserà gli Stati Uniti orientali, mentre nel 2023 un'eclissi anulare mostrerà fasi parziali sull'America sia settentrionale che meridionale. ■

PER APPROFONDIRE

Structure and Dynamics of the 2012 November 13/14 Eclipse White-Light Corona. Pasachoff J.M e altri, in «Astrophysical Journal», Vol. 800, n. 2, articolo n. 90, 20 febbraio 2015.

Key Aspects of Coronal Heating. Klimchuk J.A., in «Philosophical Transactions of the Royal Society A», Vol. 373, n. 2042, articolo n. 20140256, 28 maggio 2015.

The Sun. Golub L. e Pasachoff J.M., Reaktion Books and University of Chicago Press, 2017.

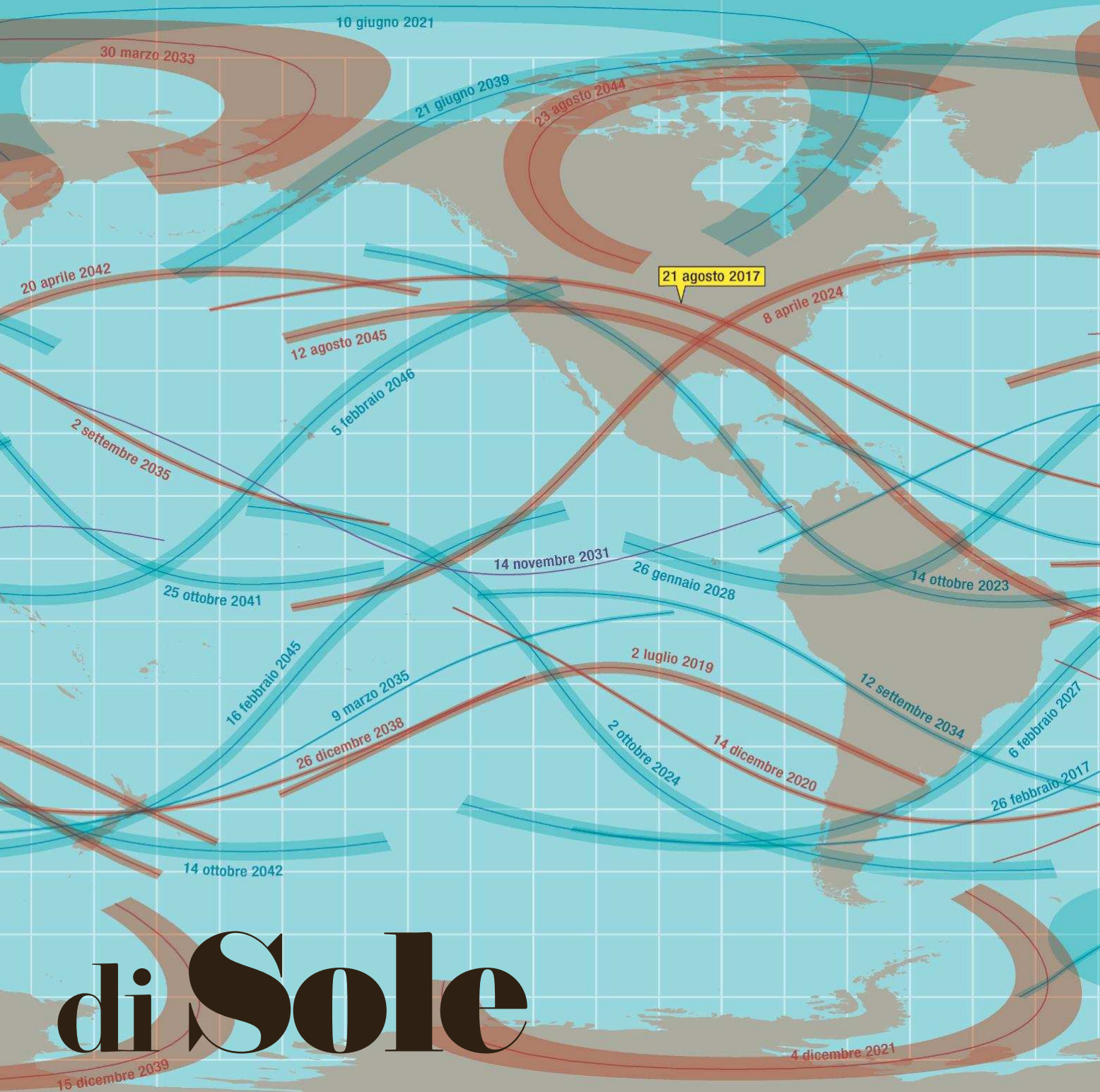
La corona solare. Pasachoff J.M., in «Le Scienze» n. 65, gennaio 1974.

Il paradosso della colonna solare. Dwivedi B.N. e Phillips K.J.H., in «Le Scienze» n. 394, giugno 2001.

1000 anni di eclissi

Viaggiando e vivendo a lungo, non mancano le occasioni per ammirare la nostra stella che scompare

L'entusiasmo in vista dell'eclissi del 21 agosto 2017 è alle stelle, ma le eclissi di Sole si verificano almeno due volte l'anno, quando le posizioni della Luna e della Terra nelle rispettive orbite si allineano con quella del Sole. La cosa insolita, questa volta, è che la Luna occulterà completamente il Sole, invece che solo in parte, e che la fascia di oscurità proiettata sulla Terra cadrà su milioni di persone anziché solo sul plancton in mare o sugli orsi bianchi o sui pinguini ai poli. Nei prossimi trent'anni si verificheranno 46 eclissi solari di vari tipi. Non perdetevi lo spettacolo. *Mark Fischetti*

Previsioni delle eclissi Fred Espenak, NASA GSFC Emeritus; consulenza di Michael Zeiler

di Sole

Percorsi delle eclissi, 2017-2046

Eclissi centrali

	Ampiezza / Linea centrale	Sole · Luna · Terra	
Totale			Il Sole è occultato e la corona è visibile
Anulare			Il bordo del Sole non è occultato
Ibrida		Traiettoria della Luna	
Eclissi parziali *(non mostrate nella cartina)*			Il Sole è occultato solo in parte

Grafica di Jan Willem Tulp (*mappa*) e Jen Christiansen (*schema*)

Vari modi di occultare il Sole

Le eclissi centrali (*mappa*) si verificano quando la Luna, vista dalla Terra, passa davanti al Sole. Ce ne sono tre tipi. L'eclissi è totale quando la Luna è abbastanza vicina alla Terra da occultare del tutto il Sole. È anulare quando la Luna è più lontana dalla Terra e occulta solo la parte centrale del Sole. È ibrida quando la distanza della Luna varia nell'evento. Un'eclissi totale crea una stretta fascia di completa oscurità sulla superficie terrestre; più la Luna è vicina, più è ampia la fascia. (Su un planisfero è esagerata la larghezza ai poli.) Gli osservatori ai lati della fascia di totalità vedranno la luce del Sole farsi più fioca, ma l'effetto svanisce a poche centinaia di chilometri di distanza.

Le eclissi fino all'anno 3000

Tra il 2017 e il 3000 gli abitanti della Terra assisteranno a 2354 eclissi solari che si verificheranno a intervalli regolari di poco meno di sei mesi (*diagramma orbitale*), il che significa che ogni anno la stagione dell'eclissi si sposta lievemente nel calendario (*spirale grande*). Le eclissi si verificano anche a cicli; ogni eclissi successiva di uno stesso ciclo proietta una banda d'ombra simile sulla Terra (*mappa*). Durante un'eclissi totale, in ogni dato luogo l'oscurità completa dura meno di sette minuti: quindi, se volete vederne una, organizzatevi in anticipo.

Come leggere la spirale

Ogni punto rappresenta un'eclissi di Sole

Totale · Anulare · Ibrida · Parziale

Le dimensioni dei punti corrispondenti alle eclissi parziali ne indicano la «magnitudo», cioè la misura in cui il Sole è occultato dalla Luna

Poco · Molto

L'eclissi del 21 agosto 2017 appartiene alla serie saros 145. Ogni eclissi di questo ciclo si verifica circa 18 anni e 11 giorni dopo la precedente. Il ciclo, già in corso, passerà nel corso del tempo da eclissi centrali a eclissi parziali.

Novembre
Ottobre
Settembre
Agosto

Creare un'eclissi

Le eclissi di Sole si verificano quando la Terra, la Luna e il Sole si allineano su un asse. Poiché sia la Terra che la Luna hanno orbite ellittiche, e poiché l'orbita della Luna è inclinata di 5,1 gradi rispetto a quella della Terra, l'allineamento può avvenire solo all'interno di una finestra di 34,5 giorni, la «stagione dell'eclissi». Ogni stagione dista dalla successiva 173,3 giorni, il che significa che si verifica un'eclissi ogni 5-6 mesi.

Lo strano ciclo di saros

Le eclissi si verificano a cicli perché, rispetto al Sole, la Terra e la Luna si riallineano allo stesso modo nelle rispettive orbite ogni 18 anni, 11 giorni e 8 ore*, un periodo di tempo detto «saros». Le eclissi separate da un saros generano percorsi di oscurità simili sulla Terra, ma a causa del terzo extra di giorno il percorso di ogni eclissi successiva è spostato di circa 120 gradi verso ovest. L'eclissi del 21 agosto 2017 appartiene al ciclo «saros 145». L'eclissi successiva dello stesso ciclo, il 2 settembre 2035, si estenderà sull'Asia e sull'Oceano Pacifico. Le successive eclissi del ciclo migreranno verso sud fino a quando non supereranno l'Antartide. Ogni ciclo di saros dura da 1225 a 1550 anni e vi si verificano da 69 a 87 eclissi che migrano verso sud o verso nord. Dopo di che, l'eclissi successiva oltrepassa il Polo Sud o il Polo Nord, mancando la Terra e concludendo il ciclo.

** L'intervallo è a volte di 18 anni, 10 giorni e 8 ore, a seconda degli anni bisestili.*

Saros 145
(Il ciclo completo è composto da 77 eclissi; qui sono mostrate quelle dalla 18 alla 26)

Limiti esterni
Ogni anello compreso fra le circonferenze esterne corrisponde a dieci anni: i decenni dal 2017-2026 al 2987-2996. Le eclissi del periodo 2997-3000 sono al di fuori dell'ultima circonferenza.

Grafica di Jan Willem Tulp (*schema radiale e mappa*) e Jen Christiansen (*diagramma orbitale*); Previsioni delle eclissi Fred Espenak, NASA GSFC Emeritus; consulenza di Michael Zeiler

Stagioni cangianti: Le 2354 eclissi (*punti*) tra il 2017 e il 3000 formano una disposizione a girandola perché la Luna impiega poco meno di 12 mesi per completare 12 orbite. Di conseguenza le stagioni delle eclissi si spostano lungo il calendario nel corso degli anni.

GENETICA

Nuovi indizi sulla SLA

Mutazioni genetiche scoperte di recente potrebbero aiutare a capire come la SLA distrugge i motoneuroni dei malati, privandoli della mobilità, e potrebbero portare a farmaci per una malattia che finora ha respinto qualsiasi tentativo di cura

di Leonard Petrucelli e Aaron D. Gitler

Illustrazione di Jeremy Wilson

Leonard Petrucelli è professore e direttore del Dipartimento di neuroscienze della Mayo Clinic di Jacksonville, in Florida.

Aaron D. Gitler è professore associato di genetica alla Stanford University School of Medicine.

La sclerosi laterale amiotrofica (SLA) colpisce senza preavviso. La malattia, che rende le cellule incapaci di interagire con i muscoli dell'organismo, insorge senza dolore, ma con lievi sintomi iniziali – spesso trascurati – come la tendenza a inciampare, a essere impacciati nei movimenti o ad articolare le parole con difficoltà. La SLA divenne nota all'opinione pubblica solo quando Lou Gehrig, leggendario giocatore di prima base dei New York Yankees, iniziò a perdere di mano la palla e a cadere in campo senza apparente motivo.

Nel giugno 1939 gli fu diagnosticata la SLA. Il mese successivo Gehrig, soprannominato «Iron Horse» (cavallo d'acciaio) per aver giocato 2130 partite consecutive in oltre 14 anni di attività, diede un commovente addio allo Yankee Stadium. La perdita del controllo sui muscoli si aggravò così rapidamente da impedirgli di partecipare, nel dicembre successivo, alla cerimonia di ammissione nella National Baseball Hall of Fame. Una graduale paralisi lo costrinse quindi a letto. Morì nel giugno 1941, all'età di 37 anni.

Ogni anno negli Stati Uniti vengono diagnosticati più di 6000 casi di SLA, detta anche «morbo di Gehrig» in America e «malattia dei motoneuroni» in Europa. In genere la malattia colpisce tra i 50 e i 60 anni di età, ma in alcuni casi può manifestarsi anche molto prima o molto più tardi, oltre gli 80 anni. Nella fase iniziale provoca la morte di cellule nervose del cervello e del midollo spinale, dette «motoneuroni». Poiché queste cellule inviano segnali dal cervello ai muscoli attraverso il midollo spinale, la loro morte determina la perdita di mobilità, destrezza, capacità di articolare le parole e perfino di deglutire. Nella maggior parte dei casi le funzioni cerebrali superiori restano intatte: i malati di SLA sono destinati ad assistere al decadimento del proprio corpo mentre la malattia incede inesorabilmente. In breve tempo si ritrovano costretti in sedia a rotelle, poi immobilizzati a letto. La maggior parte dei malati – incapaci di comunicare, mangiare e respirare in autonomia – muore nell'arco di 3-5 anni per insufficienza respiratoria. L'unico farmaco contro la SLA approvato dalla Food and Drug Administration (FDA) è il riluzolo, che bloccando il glutammato prolunga in media la sopravvivenza di tre mesi. Non esiste una cura.

Il neurologo francese Jean-Martin Charcot, che per primo identificò la malattia nel 1869, ne racchiuse una descrizione nel nome: «sclerosi» indica l'indurimento, o cicatrizzazione, che si verifica con l'avanzamento del processo degenerativo dei neuroni; «laterale» denota l'area del midollo spinale in cui è situata una parte dei motoneuroni morenti; «amiotrofica» si riferisce al mancato sviluppo dei muscoli. Nonostante la precisa definizione di Charcot, quasi un secolo e mezzo dopo la complessità della SLA sconcerta gli studiosi. La malattia è inevitabilmente letale, ma per ragioni ignote circa il 10 per cento dei malati sopravvive per più di dieci anni, qualcuno anche più a lungo. Di questa minoranza fa parte il fisico Stephen Hawking, che convive con la SLA da più di cinquant'anni. Studi recenti inducono a pensare che i fattori ambientali influiscano solo in minima parte sullo sviluppo della SLA, probabilmente rendendo più vulnerabili individui già predisposti geneticamente. A suscitare maggiori perplessità è la casualità della malattia. Meno del 10 per cento dei casi deriva da tratti genetici trasmessi di generazione in generazione in una famiglia. I casi restanti sono classificati come «non ereditari» o «sporadici».

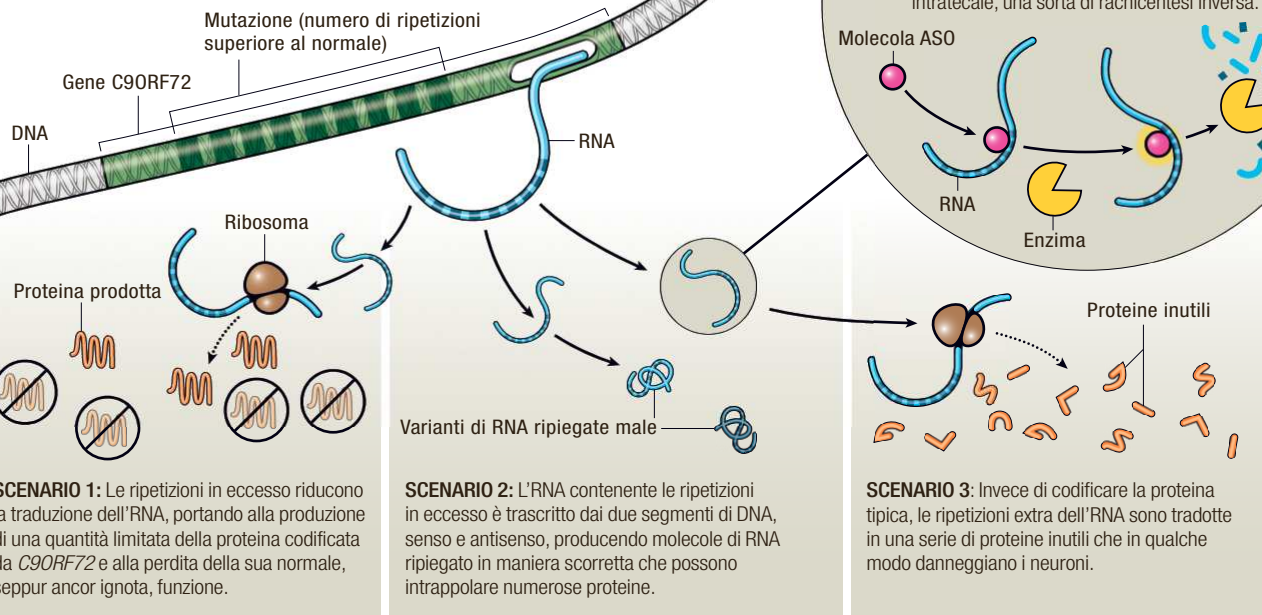
Nel decennio scorso grazie al sequenziamento sono stati fatti enormi passi avanti nello studio della biologia alla base della SLA. Ricerche in corso indicano che l'attività di molti geni differenti – che agiscono singolarmente oppure in associazione tra loro – può aumentare la predisposizione alla malattia. Alcune mutazioni specifiche sono state collegate a quasi il 70 per cento dei casi familiari e a circa il 10 per cento dei casi sporadici. Le numerose informazioni genetiche acquisite di recente stanno aprendo molte e promettenti strade al miglioramento delle cure mediche. Una delle potenziali terapie per alcune forme di SLA potrebbe essere il silenziamento genico: quest'anno saranno effettuati studi clinici su due farmaci che agiscono su geni anomali distinti. Nel frattempo gli scienziati cercano biomarcatori significativi, tra cui sostanze misurabili presenti nei liquidi corporei o attività elettriche ce-

IN BREVE

La sclerosi laterale amiotrofica (SLA), malattia neurodegenerativa nota anche come «morbo di Gehrig», attacca le cellule nervose che connettono il cervello e il midollo spinale ai muscoli di tutto il corpo.

Sofisticate tecnologie di sequenziamento genico hanno portato a numerose scoperte, svelando le basi genetiche della SLA. Studi in corso indicano che il cambiamento di uno dei numerosi geni individuati aumenta la predisposizione alla malattia.

Il silenziamento genico con una molecola sintetica detta «oligonucleotide antisenso» potrebbe costituire una potenziale terapia per alcune forme di SLA. I ricercatori studiano anche tecniche di misurazione dello stadio di avanzamento della malattia, per consentire diagnosi precoci e lo sviluppo di terapie farmacologiche.

Illustrazione di Jen Christiansen

rebrali, che possano aiutare i medici a diagnosticare tempestivamente la malattia e a stimarne con più precisione l'avanzamento. I biomarcatori potrebbero essere utili anche nello sviluppo di altre terapie farmacologiche.

Primi indizi genetici

I casi di SLA ereditaria, nella maggior parte dei quali c'è il 50 per cento di possibilità di trasmissione alla generazione successiva, costituiscono solo una piccola percentuale, ma hanno contribuito a svelare le basi genetiche di questa malattia. Il primo collegamento tra geni e SLA è emerso nel 1993 da studi che hanno individuato una mutazione nel gene *SOD1* nel 20 per cento circa dei casi di SLA familiare. *SOD1* codifica per un enzima antiossidante, la superossido dismutasi, che converte la molecola reattiva del superossido in una forma meno nociva.

Inizialmente i ricercatori hanno ipotizzato che la mutazione del gene *SOD1* indebolisse le capacità antiossidanti dell'enzima e di conseguenza permettesse ai radicali liberi dell'ossigeno di distruggere i motoneuroni. Un quarto di secolo dopo siamo quasi sicuri che non sia così. Sembra piuttosto che questa mutazione inneschi una «acquisizione di funzione tossica», per cui l'enzima svolge un'attività che normalmente non gli compete.

In particolare, la nuova funzione determina il cambiamento della forma di alcune proteine neuronali. La maggior parte delle autopsie effettuate sulle persone con SLA rivela un modello patologico cerebrale tipico: aggregati di proteine accumulati nei motoneuroni. Affinché questi neuroni possano funzionare in modo ottimale, gli elementi costituenti delle proteine devono essere riciclati con efficienza nella cellula; con la SLA, il sistema di riciclaggio smette di funzionare. Per poter operare correttamente tutte le proteine, compresi gli enzimi, devono adottare forme tridimensionali precise quando sono sintetizzate nelle cellule. I ricercatori hanno scoperto che forse le mutazioni provocano un ripiegamento scorretto delle proteine, che quindi si uniscono in aggregati. Le cellule etichettano le proteine di forma sbagliata con l'ubiquitina, un marcatore molecolare che segnala la necessità di rimuoverle. Quando il sistema di smaltimento cellulare va in sovraccarico, la spazzatura si accumula. Negli individui con alcuni tipi di SLA ereditaria, i motoneuroni si riempiono di aggregati di proteine SOD1 aberranti contrassegnati dall'ubiquitina.

La ricerca sulla SLA ha fatto un grande passo avanti nel 2006, quando gli scienziati hanno studiato malati di SLA privi di mutazioni del gene *SOD1*, scoprendo che in tutti i casi analizzati anche un'altra proteina, TDP-43, formava aggregati nei motoneuroni. TDP-43 rientra in una categoria di proteine che regolano l'attività dei segmenti di RNA messaggero, che servono come modelli per produrre le proteine codificate dalle «lettere» di DNA dei geni. TDP-43 si lega all'RNA messaggero, ne guida la maturazione

nel nucleo, lo trasferisce nel punto in cui è richiesto e svolge altre funzioni di «traduzione» dell'RNA in proteina. In qualche modo, nei casi di SLA la proteina TDP-43 è estratta dal nucleo e inizia ad accumularsi nel citoplasma circostante. È perfino possibile che vi attiri altre copie di TDP-43. Gli scienziati devono ancora capire se si tratti di una perdita di funzione della TDP-43 (perché la proteina è prelevata dal nucleo), di un'acquisizione (perché la proteina si accumula nel citoplasma) o di entrambe.

Riconoscere la TDP-43 come la principale proteina agglomerante nella maggior parte dei casi di SLA ha ristretto il campo di studi sul gene specifico che la codifica, *TARDBP*. Così sono state individuate rare mutazioni in famiglie con una forma ereditaria della malattia. La vera svolta è avvenuta quando gli scienziati hanno intuito che le alterazioni di una proteina che si lega all'RNA possono causare la SLA. Sono stati quindi identificati diversi altri geni responsabili della SLA che producono proteine coinvolte nella regolazione dell'RNA e si ritiene che possano essercene molti altri. Negli ultimi anni si è registrato un aumento esponenziale di scoperte genetiche legate alla SLA: ogni anno erano identificati uno o due nuovi geni riconducibili alla malattia. Ma la scoperta più interessante doveva ancora arrivare.

Ripetizioni di DNA fuori controllo

La scoperta è avvenuta grazie a ricerche su diverse famiglie in cui era stata osservata una forma ereditaria di SLA. Nel 2011 due gruppi hanno riferito la scoperta di un tipo particolare di mutazione in un gene con un nome particolare: *C9ORF72*, che indica la 72ª ORF, o cornice di lettura aperta – la parte del gene che codifica una proteina – sul cromosoma 9. Negli individui sani questo gene comprende una breve sequenza di DNA - GGGGCC - ripetuta da 2 a 23 volte. Nelle persone con il gene *C9ORF72* mutato, questo segmento viene ripetuto centinaia, perfino migliaia, di volte.

Ricerche successive hanno rivelato che queste ripetizioni in eccesso potrebbero essere responsabili del 40-50 per cento dei casi di SLA familiare e del 5-10 per cento dei casi in apparenza sporadici. La scoperta delle mutazioni ha permesso di trovare un legame di natura genetica tra SLA e un'altra malattia, la demenza frontotemporale, una patologia degenerativa nota anche con l'acronimo FTD. La FTD è caratterizzata da cambiamenti della personalità e del processo decisionale. Le mutazioni di *C9ORF72* possono provocare SLA o FTD, o anche una combinazione delle due, detta SLA-FTD. Un altro collegamento tra le due malattie è dato dal fatto che l'onnipresente proteina TDP-43 forma aggregati nei neuroni dei soggetti con gene *C9ORF72* mutato. Questa analogia induce a ritenere che SLA e FTD rientrino in uno spettro di malattie correlate, anche se non è ancora stato stabilito come la mutazione di uno stesso gene possa determinare sintomi così differenti.

I ricercatori stanno analizzando tre meccanismi cellulari che potrebbero chiarire come le mutazioni di questo misterioso gene possano causare la SLA. Il segmento di DNA ripetuto potrebbe interferire con i meccanismi con cui il codice genetico è normalmente copiato in RNA messaggero e successivamente tradotto nella proteina C9ORF72, riducendo la quantità di proteina sintetizzata. Questa diminuzione potrebbe attenuare gli effetti della proteina, la cui funzione esatta è però sconosciuta. In alternativa potrebbe verificarsi un'acquisizione di funzione tossica: forse la ripetizione della sequenza porta l'RNA stesso a formare aggregati che si accumulano nel nucleo dei neuroni e intrappolano le proteine che si legano all'RNA impedendo di svolgere la loro normale funzione. O forse potrebbe esserci un'acquisizione di funzione tossica per una strana variazione della biologia molecolare per cui la sequenza ripetuta è tradotta in piccole proteine anomale che si agglomerano nei neuroni delle persone con *C9ORF72* mutato.

Per ora le prove raccolte inducono a pensare che le mutazioni del gene *C9ORF72* provochino la SLA per acquisizione di funzione, anche se il contributo relativo degli aggregati di RNA e degli aggregati di proteine non è ancora stato definito con certezza. Ma in fin dei conti questa distinzione potrebbe anche essere irrilevante, in quanto i ricercatori stanno sviluppando strategie terapeutiche capaci di arrestare contemporaneamente sia la produzione di RNA che quella delle proteine derivanti dal gene mutante.

Le ripetizioni nel mirino

Il silenziamento genico per mezzo di una molecola sintetica chiamata oligonucleotide antisenso (ASO) è una delle più interessanti innovazioni terapeutiche per le malattie neurodegenerative. Il procedimento consiste nella creazione di una molecola ASO capace di legarsi alla molecola di RNA messaggero prodotta da un gene specifico, inducendo così un enzima a entrare in azione e attaccare l'ibrido RNA-ASO. In teoria gli oligonucleotidi antisenso possono portare alla distruzione selettiva di qualsiasi molecola di RNA prodotta da un gene mutante. Nel caso di *C9ORF72*, studi sui roditori indicano che le molecole antisenso sviluppate per distruggere gli aggregati di RNA nei motoneuroni possono distruggere anche gli aggregati di proteine ripetute aberranti e impedire la formazione di nuovi aggregati proteici.

I farmaci antisenso che contrastano il gene mutante *C9ORF72* dovrebbero essere sottoposti a trial clinici sugli esseri umani entro quest'anno. Intanto i ricercatori hanno sviluppato anche un agente antisenso per le forme familiari di SLA causate da *SOD1*, e i risultati ottenuti da un primo studio clinico indicano che è possibile iniettarlo negli spazi pieni di liquido della colonna vertebrale, in modo che la sostanza possa viaggiare nel liquido cefalorachidiano che circonda il cervello e farsi strada nei motoneuroni.

Il successo di un ASO sviluppato per trattare un'altra malattia neurodegenerativa, l'atrofia muscolare spinale, ha alimentato nei ricercatori un cauto ottimismo. Questa malattia genetica, che attacca i motoneuroni nei neonati, è molto simile alla SLA. Pochissimi bambini colpiti dalla malattia sopravvivono oltre il terzo anno di età. Nel corso di due recenti studi clinici su un farmaco antisenso preparato per correggere un difetto genico che porta alla formazione di RNA messaggero anormale, i bambini affetti da atrofia muscolare spinale hanno manifestato un miglioramento così netto nelle capacità motorie che l'FDA ha deciso di accelerare questi trial e a fine dicembre 2016 ha approvato il farmaco.

Comprendere le forme sporadiche

Gli studi sulle forme rare di SLA con evidente componente ereditaria hanno spianato la strada verso una maggiore conoscenza della biologia alla base della malattia. Nel futuro la sfida sarà identificare in soggetti con SLA sporadica eventuali mutazioni geniche che determinano una predisposizione alla malattia. In tutto il mondo si stanno raccogliendo campioni di DNA di malati di SLA per analizzarne i genomi.

Per accelerare i tempi, i genetisti hanno ideato un microchip che permette di effettuare i «GWAS», studi di associazione con cui confrontare rapidamente il genoma di malati di SLA e quello di persone sane. Il chip si concentra su regioni genomiche che presentano varianti chiamate «polimorfismi a singolo nucleotide», cioè punti in cui una lettera del DNA, o nucleotide, può variare da un in-

dividuo all'altro. I GWAS sono di tipo correlazionale, quindi non possono spiegare se qualcosa provoca la SLA, ma possono identificare differenze sospette che richiedono esami più approfonditi. Diversi studi GWAS effettuati a livello internazionale su oltre 10.000 malati di SLA e oltre 20.000 persone sane hanno rilevato differenze genomiche che sono oggetto di ulteriori analisi. Le nuove tecnologie hanno semplificato il processo di raccolta dei dati rendendo possibile il sequenziamento del genoma di un individuo in meno di 24 ore con una spesa inferiore a 1000 dollari. Inoltre, sequenziando solo l'esoma, cioè la parte del genoma che codifica per le proteine, è possibile ridurre ulteriormente tempi e costi.

Dopo aver raccolto un catalogo esaustivo di varianti genetiche riconducibili a una predisposizione alla SLA, i ricercatori cercheranno di decifrare i complicati meccanismi con cui le mutazioni aumentano il rischio della malattia. Per farlo, studieranno l'interazione tra vari geni e cercheranno di capire se è possibile che molteplici geni mutanti siano coinvolti in alcune forme di SLA, e come i fattori ambientali contribuiscono a innescare la malattia in alcune persone. Studi recenti suggeriscono che la SLA possa addirittura derivare in parte dal risveglio di un retrovirus dormiente, cioè una sequenza virale di DNA inseritasi molto tempo fa nel genoma e inattiva. È possibile che in alcuni individui un retrovirus passi da un neurone all'altro, provocando danni e avviando alla malattia.

Ice Bucket Challenge. I video di milioni di persone, come il pilota di formula uno Daniel Ricciardo, hanno aiutato a raccogliere fondi per la ricerca.

Mark Thompson/Getty Images

Nuove piste promettenti

Sempre più studi sembrano indicare che la SLA non consista solo nella morte dei motoneuroni. Anche le cellule gliali, più numerose dei neuroni nel cervello e nel sistema nervoso centrale, potrebbero avere un ruolo importante. Le cellule gliali svolgono svariate funzioni: costituiscono un supporto fisico per i neuroni, regolano l'ambiente interno del cervello e soprattutto il liquido che circonda i neuroni e le loro sinapsi. Studi su topi con gene *SOD1* mutato hanno dato esiti sorprendenti. L'inibizione della sintesi del gene mutante nelle cellule gliali ha prolungato la vita, nonostante la proteina tossica SOD1 fosse presente nei motoneuroni. Forse la malattia ha origine nei motoneuroni, ma la comunicazione con le cellule gliali ne determina la progressione. Le cellule gliali potrebbero contribuire alla SLA anche producendo un fattore tossico, ma non sappiamo ancora quale sia, né come funzioni. Una volta identificato questo o più fattori si potrebbe trovare come bloccarne la produzione o impedire la trasmissione del segnale errato ai motoneuroni, e rallentare o fermare la SLA.

Per svelare le cause della malattia, gli scienziati hanno cercato anche di identificare biomarcatori che aiutino a valutarne lo stadio di avanzamento. Per esempio sono in corso studi per rilevare le proteine aberranti prodotte dall'espansione del DNA del gene *C9ORF72* in liquidi corporei facilmente accessibili, come sangue o midollo spinale. A marzo uno di noi (Petrucelli) ha individuato queste proteine nel liquido cefalorachidiano di malati di SLA e SLA-FTD, oltre che in portatori asintomatici del gene mutato. Queste scoperte potrebbero aiutare a diagnosticare la malattia con tempestività. Altre ricerche sui biomarcatori si concentrano su tecnologie di *imaging* che permettano di rilevare gli aggregati della proteina TDP-43 che si accumulano nel cervello dei malati di SLA prima che inizino a distruggere i motoneuroni. Questi biomarcatori potrebbero anche essere utili riferimenti per valutare l'efficacia di eventuali terapie nel corso di trial clinici.

I rapidi progressi in genetica e genomica, con lo sviluppo di nuovi e migliori biomarcatori, daranno il via a un'epoca di medicina di precisione per la SLA. In un futuro prossimo, gli ammalati saranno sottoposti a terapie e profilassi personalizzate in base alla forma di SLA da cui sono affetti.

Il potere dei social media

Molti progressi dell'ultimo decennio sono stati possibili grazie ai tanti malati che hanno offerto il proprio tempo e DNA per gli studi genomici. I malati di SLA e le loro famiglie hanno inoltre aiutato a sensibilizzare l'opinione pubblica e a promuovere raccolte di fondi per la ricerca e l'assistenza ai pazienti grazie alla cassa di risonanza dei *social media*.

Nel 2014 la sfida chiamata «ALS Ice Bucket Challenge» ha conquistato la rete. Pete Frates, ex capitano della squadra di baseball dei Boston College, a cui due anni prima – all'età di 27 anni – era stata diagnosticata la SLA, ha contribuito a mettere in moto la raccolta di fondi promossa dalla ALS Association (organizzazione no-profit statunitense) postando un video su Facebook in cui invitava gli amici a versarsi un secchio di acqua ghiacciata sulla testa. La campagna è diventata virale quando celebrità come Mark Zuckerberg, Bill Gates, Oprah Winfrey, Leonardo di Caprio e LeBron James hanno accettato la sfida. In otto settimane, gli utenti di Facebook hanno postato più di 17 milioni di video di «docce gelate» in sostegno alla causa. Alla fine sono stati raccolti più di 115 milioni di dollari, di cui il 67 per cento è stato destinato alla ricerca, il 20 per cento a malati e servizi sociali e il 9 per cento a progetti di informazione pubblica e formazione professionale.

La SLA è una malattia crudele e inesorabile. Prima del commovente discorso di Gehrig allo Yankee Stadium, divenuto celebre perché il giocatore si definì «l'uomo più fortunato sulla faccia della Terra», e della divulgazione della sua diagnosi, la maggior parte dei malati soffriva in silenzio. Oggi l'opinione pubblica è più consapevole, grazie anche a persone come Frates. La campagna web da lui promossa ha triplicato il budget per la ricerca dell'ALS Association. Gli scienziati ritengono che l'aumento delle nostre conoscenze sulla biologia della SLA continuerà anche in futuro e che ampliando le ricerche sui geni aberranti sarà possibile migliorare le terapie per arginare questo assassino invisibile. ■

PER APPROFONDIRE

State of Play in Amyotrophic Lateral Sclerosis Genetics. Renton A.E., Chiò A. e Traynor B.J., in «Nature Neuroscience», Vol. 17, n. 1, pp. 17–23, gennaio 2014.

Decoding ALS: From Genes to Mechanism. Taylor J.P., Brown R.H. Jr. e Cleveland D.W., in «Nature», Vol. 539, pp. 197–206, 10 novembre 10 2016.

Difendersi dal morbo di Gehrig. Aebischer P., Kato A.C., in «Le Scienze» n. 473, gennaio 2008.

APPRENDIMENTO AUTOMATICO

Come fare un'IA più umana

Il ritorno dell'intelligenza artificiale inizia a sfruttare quello che sappiamo dell'apprendimento infantile

di Alison Gopnik

Alison Gopnik è professoressa di filosofia e *affiliate professor* di psicologia all'Università della California a Berkeley. La sua ricerca riguarda il modo in cui i bambini arrivano a conoscere il mondo che li circonda.

Se passate molto tempo con i bambini, finirete inevitabilmente per chiedervi come sia possibile per giovani esseri umani imparare tante cose così in fretta. Se lo sono chiesto anche i filosofi, fin dai tempi di Platone, ma una buona risposta non l'hanno mai trovata. Il mio nipote di cinque anni, Augie, conosce piante, animali e orologi, per non parlare di dinosauri e astronavi.

Capisce anche che cosa vogliono gli altri, che cosa pensano e che cosa sentono. Sa usare queste conoscenze per classificare quello che vede e ascolta, e fare nuove previsioni. Di recente ha dichiarato che la nuova specie di titanosauro da poco scoperta ed esposta all'American Museum of Natural History di New York si nutriva di piante, dunque non fa poi tanta paura.

Eppure, tutto quello che arriva ad Augie dal suo ambiente è un flusso continuo di fotoni che colpisce la sua retina e le perturbazioni dell'aria che arrivano ai suoi timpani. Il computer neurale che si trova dietro i suoi occhi azzurri riesce in qualche modo a partire dalle limitate informazioni che arrivano dai suoi sensi per poi finire con previsioni sui titanosauri erbivori. Una domanda ancora aperta è se anche i computer elettronici possano farlo oppure no.

Negli ultimi 15 anni informatici e psicologi hanno cercato una risposta. I bambini acquisiscono una gran quantità di conoscenze con poche istruzioni da parte di genitori e insegnanti. Malgrado gli enormi balzi in avanti dell'intelligenza delle macchine, addirittura i computer più potenti ancora non sono bravi a imparare quanto un bimbo di cinque anni.

Capire come funzioni in realtà il cervello dei bambini – e poi farne una versione digitale che funzioni altrettanto bene – è una sfida che terrà impegnati gli informatici ancora per decenni. Ma nel frattempo i ricercatori iniziano a sviluppare intelligenze artificiali che incorporano qualcosa di quello che sappiamo su come imparano gli esseri umani.

Ai piani superiori

Dopo la prima fiammata di entusiasmo degli anni cinquanta e sessanta, la ricerca sull'intelligenza artificiale (IA) ha languito per decenni. Negli ultimi anni, tuttavia, ci sono stati progressi sorprendenti, soprattutto nell'apprendimento automatico, e l'intelligenza artificiale è diventata uno dei campi più esaltanti dello sviluppo tecnologico. Sono emerse molte previsioni, utopistiche o apocalittiche, su ciò che significano questi progressi. Sono stati presi letteralmente come preannuncio dell'immortalità o della fine del mondo, e si è scritto molto su entrambe le possibilità.

Sospetto che gli sviluppi dell'IA provochino sentimenti così forti a causa dei nostri profondi e radicati timori verso il «quasi umano». L'idea che qualcosa possa superare il fossato che separa l'umano dall'artificiale ha sempre destato profonde inquietudini, dal golem del Medioevo al mostro di Frankenstein, e poi fino ad Ava, la sexy robot fatale del film *Ex Machina*.

Ma davvero i computer apprendono bene come gli esseri umani? Fino a che punto questa retorica indica un cambiamento rivoluzionario, e fino a che punto sono solo esagerazioni? I dettagli del modo in cui un computer impara a riconoscere, diciamo, un gatto, una parola pronunciata o un carattere giapponese possono essere difficili da seguire. Tuttavia, guardando meglio, le idee di base delle macchine che imparano non sono poi così sconcertanti come sembrano inizialmente.

Un primo approccio cerca di risolvere il problema partendo dal flusso di fotoni e dalle vibrazioni dell'aria che Augie riceve, come tutti noi, e che al computer arrivano sotto forma di pixel di un'immagine digitale o di campionamenti di una registrazione sonora. Poi nei dati digitali il computer cerca di estrarre una serie di schemi ricorrenti capaci di rilevare un intero oggetto del mondo circostante. Questo approccio dal basso verso l'alto (*bottom-up*) affonda le sue radici, fra l'altro, nelle idee di filosofi come David Hume e John Stuart Mill e di psicologi come Ivan Pavlov e B.F. Skinner.

Negli anni ottanta gli scienziati progettarono un modo ingegnoso e convincente per applicare metodi bottom-up in modo da far cercare ai computer schemi significativi nei dati. I sistemi «connessionisti», o «reti neurali», sono ispirati al modo in cui i neuroni convertono gli schemi della luce sulla nostra retina in rappresentazioni del mondo che ci circonda. Una rete neurale fa qualcosa di simile: usa elementi di elaborazione interconnessi, analoghi alle cellule biologiche, per trasformare i pixel in uno strato della rete in rappresentazioni sempre più astratte – un na-

IN BREVE

Come fanno i bambini a sapere quello che sanno? Filosofi e scienziati se lo chiedono da tempo; adesso lo fanno anche gli scienziati informatici.

Gli specialisti dell'intelligenza artificiale studiano le capacità di ragionamento dei bambini in età prescolare per sviluppare metodi con cui insegnare alle macchine qualcosa sul mondo.

Due strategie rivali per l'apprendimento automatico, entrambe tentativi incerti di imitare quello che i bambini fanno naturalmente, hanno cominciato a trasformare il campo dell'IA.

Illustrazione di Simon Prades: pagine precedenti

STRATEGIE OPPOSTE

Due strade per la rinascita dell'IA

Problemi facilmente risolvibili da ogni bambino di cinque anni possono bloccare anche i computer più potenti. L'IA è tornata alla ribalta negli ultimi anni, dotando i computer di modalità di apprendimento in qualche modo simili a quelle dei bambini. Una macchina può riconoscere la lettera «A», per esempio, partendo dall'informazione sensoriale grezza (approccio bottom-up) o formulando un'ipotesi in base a conoscenze preesistenti (approccio top-down).

Illustrazione di Jen Christiansen. Fonte: Brenden M. Lake, Ruslan Salakhutdinov e Joshua B. Tenenbaum, *Human-Level Concept Learning Through Probabilistic Program Induction*, in «Science», Vol. 350, 11 dicembre 2015 (*esempio bayesiano*)

so o un intero viso – via via che i dati sono elaborati a livelli sempre più elevati.

Di recente le idee legate alle reti neurali hanno conosciuto una ripresa grazie a nuove tecniche chiamate «apprendimento profondo», una tecnologia attualmente messa in commercio da Google, Facebook e da altri colossi della tecnologia. Al nuovo successo di questi sistemi ha contribuito in parte anche la crescente potenza dei computer, ovvero la crescita esponenziale delle capacità computazionali descritta dalla legge di Moore; e lo stesso si può dire per lo sviluppo di giganteschi insiemi di dati. Grazie a migliori capacità di elaborazione e alla maggiore quantità di dati su cui lavorare, i sistemi connessionisti possono imparare in modo assai più efficiente rispetto a quanto avremmo potuto pensare solo pochi anni fa.

Negli anni la comunità dell'IA ha oscillato tra la preferenza di questo genere di soluzioni dal basso verso l'alto per l'apprendimento automatico e gli approcci alternativi, dall'alto verso il basso (*top-down*). Gli approcci dall'alto verso il basso sfruttano quello che un sistema conosce già per aiutarlo a imparare qualcosa di nuovo. Platone e cosiddetti filosofi razionalisti come René Descartes (Cartesio) credevano in un approccio top-down all'apprendimento, e questa idea ha avuto un ruolo forte agli albori dell'intelligenza artificiale. Negli anni duemila questi metodi hanno anche sperimentato una rinascita nella forma di modelli probabilistici, o bayesiani.

Come gli scienziati, i sistemi top-down partono dalla formulazione di ipotesi astratte e di ampia portata sul mondo. Poi i sistemi fanno previsioni su come dovrebbero apparire i dati nel caso in cui queste ipotesi fossero corrette; e quindi, sempre come gli scienziati, rivedono le loro ipotesi alla luce di una verifica delle previsioni.

Nigeria, Viagra e spam

I metodi che partono dal basso sono forse più facili da capire, quindi cominciamo da qui. Immaginiamo di voler far separare al nostro computer i messaggi importanti dallo spam nella casella di posta in arrivo. Potremmo osservare che lo spam tende ad avere una serie di caratteristiche distintive: una lunga lista di indirizzi di destinazione, l'indirizzo di partenza in Nigeria o Bulgaria, riferimenti a premi da un milione di dollari o al Viagra. Però anche un messaggio utile potrebbe avere un aspetto simile. E non vorremmo certo perderci l'annuncio di aver ottenuto una promozione o un riconoscimento accademico.

Se confrontiamo abbastanza esempi di spam con altri tipi di e-mail, potremmo notare che solo lo spam tende ad avere determinate caratteristiche combinate in maniera significativa: per esempio, Nigeria e promessa di un premio da un milione di dollari messe insieme significano guai. In effetti potrebbero esserci andamenti ricorrenti sottili e di più alto livello che distinguono tra messaggi di spam e messaggi utili, per esempio errori di ortografia e indirizzi IP per nulla ovvi. Se riuscissimo a individuarli, si potrebbe filtrare con precisione lo spam, senza il rischio che ci sfugga l'avviso di spedizione del Viagra da noi ordinato.

Una macchina capace di un apprendimento bottom-up può

scovare gli indizi rilevanti per risolvere questo genere di compito. Per farlo, una rete neurale deve passare attraverso un proprio processo di apprendimento. Valuta milioni di esempi tratti da enormi banche dati, ciascuno etichettato come spam oppure come e-mail valida. Poi il computer estrae un insieme di caratteristiche identificative che separano lo spam da tutto il resto.

In modo analogo, la rete potrebbe ispezionare immagini da Internet etichettate come «gatto», «casa», «stegosauro» e così via. Estraendo i tratti comuni di ciascun insieme di immagini – gli schemi ricorrenti che distinguono tutti i gatti da tutti i cani – potrà poi identificare le nuove immagini di gatti, anche se quelle particolari immagini non le ha mai viste prima.

Uno di questi metodi bottom-up, l'apprendimento senza supervisione, è ancora relativamente agli inizi, ma può individuare regolarità in dati senza etichette. Cerca semplicemente gruppi di caratteristiche che identificano oggetti: nasi e occhi, per esempio, vanno sempre insieme a formare volti, e sono diversi da alberi e montagne di sfondo. In queste reti avanzate ad apprendimento profondo l'identificazione degli oggetti avviene mediante una divisione del lavoro in cui i vari compiti di riconoscimento sono divisi fra i diversi livelli della rete.

Far apprendere l'IA da grandi insiemi di dati – milioni di immagini su Instagram o di messaggi e-mail – permette di risolvere problemi che un tempo sembravano scoraggianti

Un articolo pubblicato su «Nature» nel 2015 ha dimostrato fino a che punto sono arrivati i metodi bottom-up. I ricercatori di DeepMind, società di Google, hanno usato una combinazione di due diverse tecniche di questo tipo – apprendimento profondo e apprendimento con rinforzo – in un modo che ha permesso a un computer di padroneggiare videogiochi di Atari 2600. Il computer ha cominciato senza sapere nulla di come funzionava il gioco. Inizialmente ha fatto mosse casuali ricevendo feedback costanti sulla sua prestazione. L'apprendimento profondo ha aiutato il sistema a identificare caratteristiche sullo schermo, e l'apprendimento con rinforzo lo ha premiato quando ha ottenuto un buon punteggio. Il computer ha raggiunto una capacità di alto livello in diversi giochi; in alcuni casi ha ottenuto risultati migliori di giocatori umani esperti. Detto questo, il computer ha anche ottenuto scarsi risultati in altri giochi che per gli esseri umani sono altrettanto facili da padroneggiare.

Far imparare l'intelligenza artificiale da grandi insiemi di dati – milioni di immagini su Instagram, messaggi e-mail o registrazioni vocali – permette di risolvere problemi che un tempo sembravano scoraggianti, come il riconoscimento di immagini e del parlato. Vale tuttavia la pena di ricordare che mio nipote non ha la minima difficoltà a riconoscere un animale o a rispondere a una domanda fatta a voce, pur avendo avuto dati e addestramento assai più limitati. Problemi che risultano facili per un essere umano di cinque anni sono ancora estremamente complicati per i computer, e molto più difficili che imparare a giocare a scacchi.

Spesso computer che imparano a riconoscere un muso peloso con lunghi baffi richiedono milioni di esempi per categorizzare oggetti che noi in genere classifichiamo con pochi esempi. Dopo un addestramento completo, il computer può arrivare a identificare l'immagine di un gatto che non ha mai visto prima. Tuttavia lo fa in un modo molto diverso dalle generalizzazioni degli esseri umani. E dato che il programma ragiona in modo diverso può prendere cantonate. Certe immagini di gatti non saranno etichettate come gatti. E il computer potrebbe dire erroneamente che un'immagine è un gatto, sebbene in realtà sia solo una macchia casuale, che non trarrebbe mai in inganno un osservatore umano.

Tutto in discesa

L'altro approccio all'apprendimento automatico che in anni recenti ha trasformato il campo dell'IA lavora in direzione opposta, dall'alto verso il basso. Ipotizza che possiamo ricavare conoscenze astratte da dati concreti perché sappiamo già molto e soprattutto perché il cervello è in grado di capire concetti astratti di base. Come gli scienziati, possiamo usare quei concetti per formulare ipotesi sul mondo e previsioni su come dovrebbero apparire i dati (gli eventi) se quelle ipotesi fossero giuste, il contrario di cercare di estrarre schemi dai dati grezzi, come nell'IA bottom-up.

L'idea può essere illustrata ritornando allo spam con un esempio personale. Ho ricevuto un'e-mail dal redattore di una rivista scientifica dallo strano nome, che faceva riferimento a un mio lavoro e mi proponeva di scrivere un articolo per la sua pubblicazione. Niente Nigeria, niente Viagra, niente milioni di dollari: nel messaggio non c'era nessuno dei comuni indicatori dello spam. Ma usando quello che già sapevo, e pensando in modo astratto al processo che produce lo spam, ho capito che era un messaggio sospetto.

Per cominciare, so che lo spam è un tentativo di spremere soldi alle persone sfruttando l'avidità umana, e gli accademici possono essere avidi di pubblicazioni quanto le persone comuni lo sono di premi da un milione di dollari e migliori prestazioni sessuali. So anche che legittime riviste «open access» hanno cominciato a coprire le proprie spese facendo pagare gli autori invece dei sottoscrittori. Inoltre il mio lavoro non ha nulla a che fare con il titolo della rivista. Mettendo insieme tutto questo ho formulato l'ipotesi plausibile per cui quel messaggio tentava di imbrogliare accademici facendosi pagare per «pubblicare» articoli su una rivista inesistente. Sono potuta arrivare a questa conclusione da un solo esempio, e ho potuto proseguire verificando con un motore di ricerca se il redattore era davvero quello che diceva di essere.

Un informatico potrebbe chiamare «modello generativo» questo modo di ragionare, capace di rappresentare concetti astratti come avidità e inganno. Lo stesso modello può anche descrivere il processo usato per generare un'ipotesi: il ragionamento che ha portato alla conclusione che il messaggio poteva essere una truffa via e-mail. Il modello mi permette di spiegare come funziona questo tipo di spam, mi permette anche di immaginare altri tipi di spam o addirittura un tipo differente da tutti gli altri. Ricevuta l'e-mail della rivista, il modello mi permette di risalire all'indietro ricostruendo, passo dopo passo, perché deve essere spam.

I modelli generativi sono stati essenziali nella prima ondata dell'IA e delle scienze cognitive degli anni cinquanta e sessanta. Ma avevano dei limiti. Primo, in linea di principio la maggior parte delle serie di prove potrebbe essere spiegata da molte ipotesi diverse. Nel mio caso, il messaggio e-mail poteva anche essere legittimo, sebbene fosse improbabile. Quindi i modelli generativi devono inglobare idee di tipo probabilistico, uno dei più importanti sviluppi recenti di questi metodi. Secondo, spesso non

è chiaro da dove vengano i concetti base di cui sono fatti i modelli generativi. Descartes e Noam Chomsky hanno suggerito che nasciamo avendoli già in testa, ma davvero veniamo al mondo sapendo già che avidità e inganno producono truffe?

I modelli bayesiani – esempio lampante di un recente approccio top-down – cercano di affrontare entrambe le questioni. Chiamati così in onore di Thomas Bayes, statistico e filosofo britannico del XVIII secolo, combinano modelli generativi e teoria delle probabilità mediante una tecnica chiamata inferenza bayesiana. Un modello generativo probabilistico può dirci quanto è probabile vedere uno specifico andamento dei dati nel caso in cui una certa ipotesi sia vera. Se l'e-mail è un'esca per una truffa, probabilmente farà appello all'avidità del ricevente. Ma ovviamente un messaggio può fare appello all'avidità anche se non è spam. Un modello bayesiano combina le conoscenze che già abbiamo sulle ipotesi potenziali con i dati che vediamo in modo da permetterci di calcolare, con precisione assai notevole, quanto sia probabile che un certo messaggio e-mail sia valido o sia spam.

Questo metodo top-down corrisponde meglio di quello bottom-up a quello che sappiamo su come imparano i bambini. Per questo negli ultimi 15 anni con i miei colleghi abbiamo usato modelli bayesiani nel nostro lavoro sullo sviluppo infantile. Il nostro e altri laboratori hanno usato queste tecniche per simulare il modo in cui i bambini imparano i rapporti di causa ed effetto, prevedendo come e quando i piccoli svilupperanno nuove convinzioni sul mondo e quando cambieranno le convinzioni che già hanno.

I metodi bayesiani sono anche un eccellente modo per insegnare alle macchine ad apprendere come le persone. Nel 2015 Joshua B. Tenenbaum, del Massachusetts Institute of Technology, con il quale a volte collaboro, Brenden Lake, della New York University, e colleghi hanno pubblicato uno studio su «Science». Hanno progettato un sistema di IA che riconosce caratteri sconosciuti scritti a mano, un lavoro semplice per le persone ma estremamente gravoso per un computer.

Pensiamo alle nostre capacità di riconoscimento. Anche chi non ha mai visto un certo carattere giapponese probabilmente può dire se è uguale o diverso da un altro carattere preso da un altro testo. E probabilmente potrà scrivere quel carattere, e anche inventare un carattere pseudo-giapponese, e capire anche che il suo aspetto è assai diverso da quello di un carattere coreano o russo. Proprio quello che il programma di Tenenbaum e colleghi riesce a fare.

Con un metodo bottom-up, al computer verrebbero presentati migliaia di esempi, poi il computer userebbe gli schemi trovati in quegli esempi per identificare nuovi caratteri. Il programma bayesiano dà invece alla macchina un modello generale di come si traccia un carattere: un tratto di penna, per esempio, può andare a destra o a sinistra, e dopo aver terminato di elaborare un carattere il programma passa al prossimo.

Quando il programma vede un certo carattere, può inferire la sequenza dei tratti necessari a tracciarlo, e poi arrivare a produrre per conto proprio una sequenza di tratti analoga. Lo fa nello stesso modo in cui ho inferito la serie di passi che aveva portato al mio ambiguo messaggio di spam nella posta elettronica. Invece di soppesare se una truffa di marketing probabilmente portava, o meno, a quella e-mail, il modello di Tenenbaum ha cercato di indovinare se una particolare sequenza di tratti dava o meno il carattere desiderato. Questo programma top-down ha funzionato assai meglio di quelli ad apprendimento profondo applicato agli stessi dati, e ha riflettuto da vicino le prestazioni degli esseri umani.

Una coppia perfetta

Questi due approcci di punta all'apprendimento automatico, top-down e bottom-up, hanno limiti e punti di forza complementari. Con un metodo bottom-up, il computer non deve sapere nulla dei gatti per iniziare, ma necessita di una grande quantità di dati.

I sistemi bayesiani possono apprendere da pochi esempi e generalizzare più ampiamente. Ma questo approccio top-down richiede molto lavoro iniziale per articolare il giusto insieme di ipotesi. E nel progettare sia l'uno sia l'altro tipo di sistemi ci si può imbattere nello stesso tipo di ostacoli. Entrambi gli approcci funzionano solo per problemi relativamente ristretti e ben definiti, come riconoscere caratteri scritti o gatti, o giocare ai videogiochi Atari.

I bambini non soffrono di questo tipo di vincoli. Gli psicologi dello sviluppo hanno trovato che i piccoli combinano in qualche modo le migliori qualità dei due approcci e poi vanno molto oltre. Augie può imparare da un solo esempio, o due, come fa un sistema top-down. Ma in qualche modo può anche estrarre concetti nuovi dai dati stessi, come i sistemi bottom-up. Concetti che non erano lì fin dall'inizio.

Augie in realtà può fare molto di più. Riconosce subito i gatti e distingue le lettere l'una dall'altra, ma riesce anche fare nuove inferenze, creative e sorprendenti, che vanno oltre le sue esperienze e conoscenze di fondo. Di recente ha spiegato che se un adulto vuole tornare piccolo dovrebbe provare a non mangiare più nessuna di quelle verdure che fanno tanto bene, e fanno diventare grandi i bambini. Non abbiamo idea, o quasi, di come emerga questo tipo di ragionamento creativo.

La stupidità naturale può fare molti più danni dell'intelligenza artificiale, e noi umani dobbiamo essere molto più intelligenti che in passato nel regolare le nuove tecnologie nel modo giusto

Quando sentiamo dire che l'IA minaccia la nostra esistenza, dovremmo ricordarci dei poteri della mente umana ancora misteriosi. Intelligenza artificiale e macchine che apprendono sembrano terrificanti. E per certi versi lo sono. La ricerca militare punta a usare questi sistemi per il controllo dei sistemi d'arma. La stupidità naturale può fare molti più danni dell'intelligenza artificiale, e noi umani dobbiamo essere molto più intelligenti che in passato nel regolare le nuove tecnologie nel modo giusto. La legge di Moore è una forza influente: anche quando derivano da aumenti quantitativi dei dati e della potenza di calcolo, e non da rivoluzioni concettuali nella nostra comprensione della mente, i progressi nel calcolo possono comunque avere conseguenze pratiche di grande portata. Detto questo, però, non dovremmo pensare che sta per essere liberato un nuovo golem tecnologico. ■

PER APPROFONDIRE

Bayesian Networks, Bayesian Learning and Cognitive Development. Gopnik A. e altri,in «Developmental Science», Vol. 10, n. 3, pp. 281-287, maggio 2007.

Human-Level Concept Learning through Probabilistic Program Induction. Lake B.M. e altri, in «Science», Vol. 350, pp. 1332-1338, 11 dicembre 2015.

Essere genitori non è un mestiere. Cosa dice la scienza sulle relazioni tra genitori e figli. Gopnik A., Bollati Boringhieri, Torino, 2017.

Macchine che imparano. Bengio Y., in «Le Scienze» n. 576, giugno 2016.

BIOGEOGRAFIA

Le frontiere della vita

di G. Francesco Ficetola

Differenze climatiche di ieri e di oggi, movimenti tettonici e catene montuose spiegano le differenze nella distribuzione della vita sulla Terra

Coppia caratteristica. Canguri nella prateria; questi animali sono una delle icone dell'Australia, proprio come altre specie sono caratteristiche ed esclusive di precise regioni del mondo.

Bart Brouwer/EyeEm/Getty Images

Da sempre i naturalisti sanno che le specie animali e vegetali non sono distribuite in modo omogeneo sulla Terra: se voglio vedere i leoni probabilmente viaggerò in Africa, mentre per cercare canguri e koala dovrò andare in Australia. Oltre un secolo fa il naturalista britannico Alfred Russel Wallace usò le conoscenze allora disponibili sulla distribuzione dei mammiferi e degli uccelli per provare a descrivere le differenze di fauna tra le varie aree del mondo. Acceso sostenitore della teoria dell'evoluzione insieme a Charles Darwin, Wallace è tuttora considerato il padre della biogeografia, ovvero la scienza che studia la distribuzione degli organismi. Dopo aver viaggiato a lungo tra Asia e Oceania, Wallace si rese conto che una frontiera biogeografica separava l'Australia, abitata soprattutto da marsupiali come i canguri e i koala, dall'arcipelago indonesiano, abitato da mammiferi simili a quelli che vivono nel resto dell'Asia.

IN BREVE

Le specie non sono distribuite in modo omogeneo sul nostro pianeta, un fenomeno che già aveva incuriosito naturalisti del calibro di Alfred Russel Wallace nel XIX secolo.

Proprio Wallace, grazie alle sue osservazioni, aveva diviso il mondo in sei regioni biogeografiche principali; ciascuna di queste regioni ospita una fauna unica e combinazioni di specie che non si osservano in altre aree della Terra.

Ora gli scienziati sono riusciti a identificare quali fattori determinano le divergenze tra le aree biogeografiche, rilevando però anche che i confini di queste aree sono sempre meno chiari a causa delle attività umane, incluso il riscaldamento globale.

Quella tra Australia e Asia non è l'unica frontiera biogeografica. Per esempio Wallace si rese conto che la fauna nordamericana è molto diversa da quella che vive a sud del Messico, o che la fauna di India e Indonesia ha poco in comune con il resto dell'Asia. Queste osservazioni gli permisero di dividere il mondo in sei regioni biogeografiche principali (chiamate anche regni), ognuna dei quali ospita una fauna unica e combinazioni di specie che non si osservano altrove. Wallace le battezzò regione paleartica (Europa e parte dell'Asia), neartica (Nord America), neotropicale (Sud e Centro America), etiopica (la maggior parte dell'Africa), orientale (Sudest asiatico) e australiana (*si veda il box a fronte*). Queste macroregioni corrispondono solo in parte ai continenti, e si possono dividere in un certo numero di sottoregioni.

Oltre un secolo dopo le prime carte pubblicate da Wallace, la ricerca biogeografica resta attiva e attuale. Wallace era stato costretto a disegnare le sue carte sulla base di informazioni incomplete sulla distribuzione di un certo numero di specie di mammiferi e uccelli. Da alcuni anni però vengono pubblicati dati sempre più precisi su un numero sempre più consistente di specie. Per esempio l'Unione internazionale per la conservazione della natura (o IUCN, da International Union for Conservation of Nature) ha pubblicato le carte di distribuzione di 28.000 specie di anfibi, mammiferi, rettili e uccelli, che possono essere liberamente consultate. Questi dati di distribuzione, sempre più accurati, sono poi analizzati con tecniche statistiche raffinate, che permettono di elaborare rapidamente i dati di migliaia di specie, considerando anche la distanza evolutiva tra le diverse specie.

Tutto ciò consente analisi sempre più precise e meno soggettive. Tra il 2012 e il 2013 due gruppi di ricerca hanno pubblicato in modo indipendente nuove carte biogeografiche del mondo, proponendo una regionalizzazione basata sull'analisi dei dati di distribuzione di migliaia di specie. I risultati di queste analisi (*si veda il box a fronte*) sono sorprendentemente simili a quelli che Wallace aveva ottenuto senza metodi quantitativi, e confermano la genialità del grande naturalista. Le nuove carte biogeografiche hanno però una risoluzione e un'accuratezza senza precedenti, e

G. Francesco Ficetola è professore associato di zoologia all'Università di Milano. Si occupa dei fattori che determinano la distribuzione della biodiversità animale sia a scala globale che locale e cerca di capire come le specie rispondono alle modificazioni ambientali causate dall'uomo.

permettono di misurare le relazioni e il tasso di divergenza tra le diverse aree. Le sei macroregioni di Wallace possono essere divise in 11 regioni, che a loro volta possono essere divise in 20 sottoregioni. La divergenza tra macroregioni è maggiore rispetto a quella tra regioni, che a loro volta sono più diverse tra loro di quanto siano le sottoregioni. Immaginiamo di viaggiare dall'Africa subsahariana verso l'Africa centrale: durante il viaggio osserverò differenze faunistiche relativamente limitate; per esempio in entrambe le aree sono presenti mammiferi come l'oritteropo e molte specie di primati, e tutta l'Africa a sud del Sahara condivide gli stessi gruppi di anfibi. Le differenze sono molto maggiori se mi sposto verso l'Africa settentrionale, e diventano ancora più forti tra Nord Africa ed Europa.

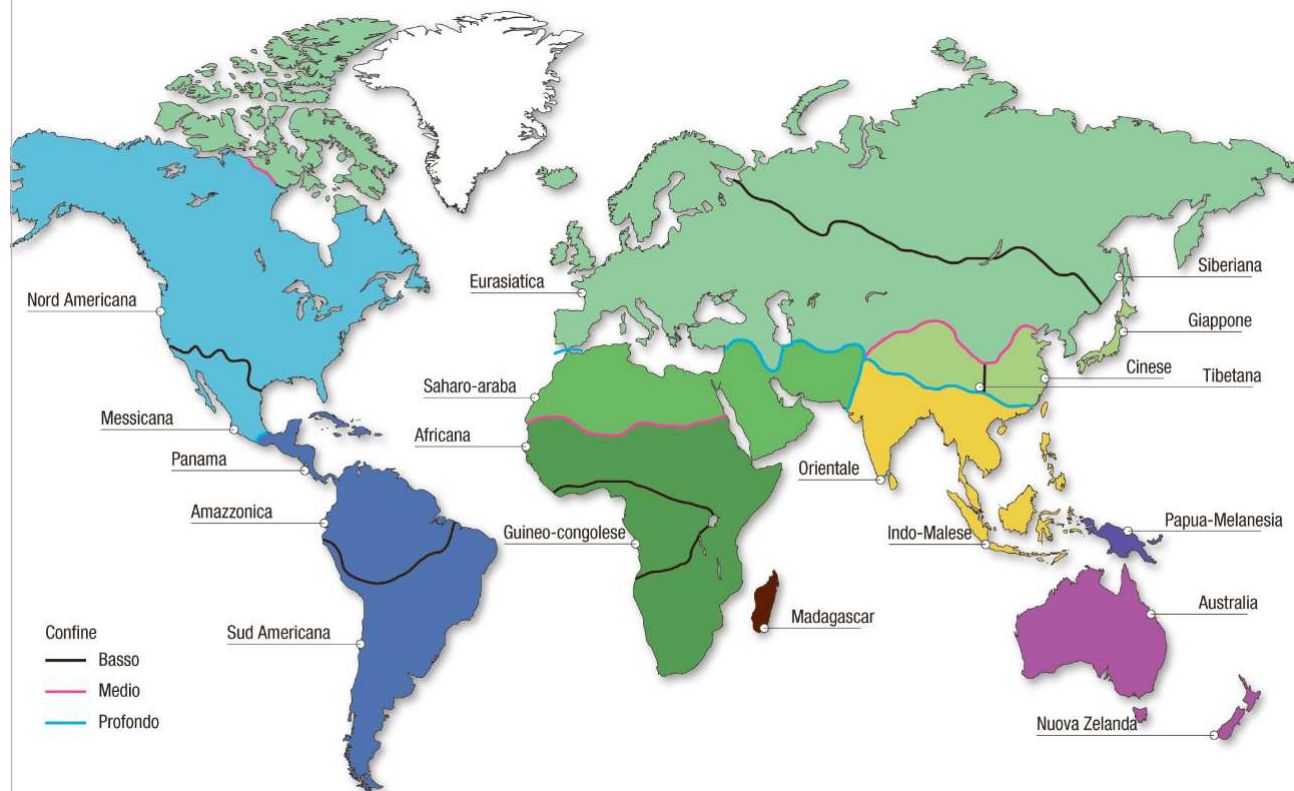
Arrivano i dati

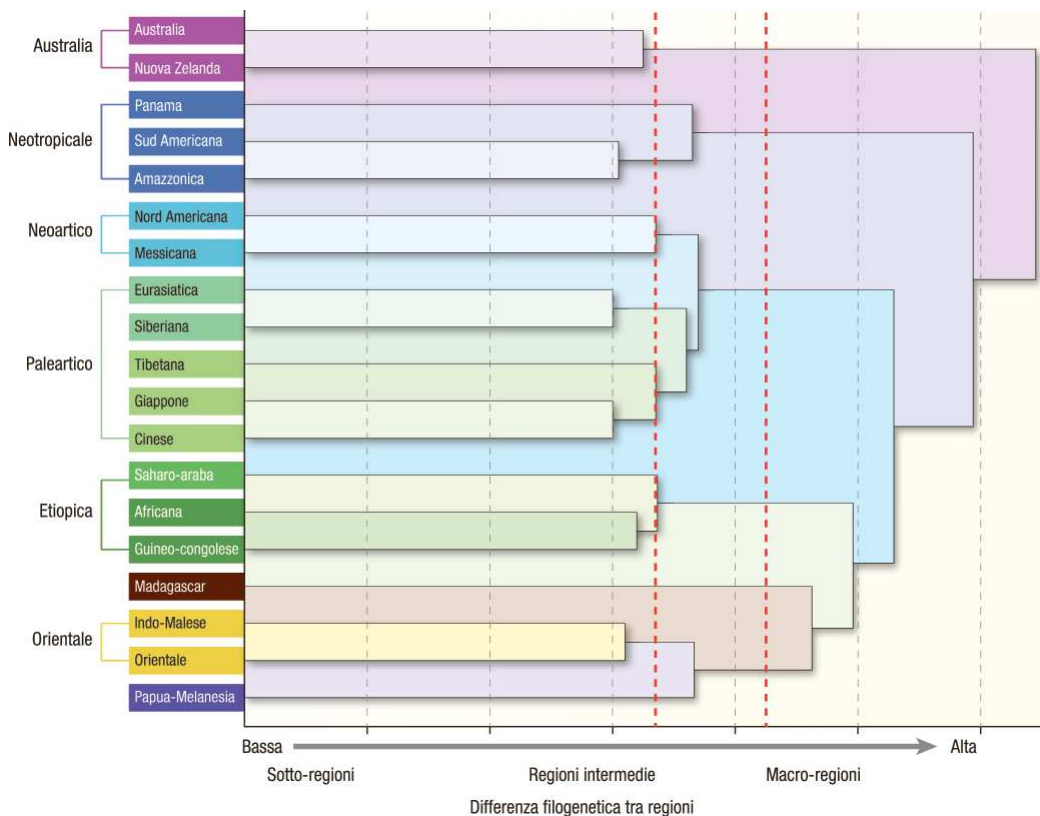
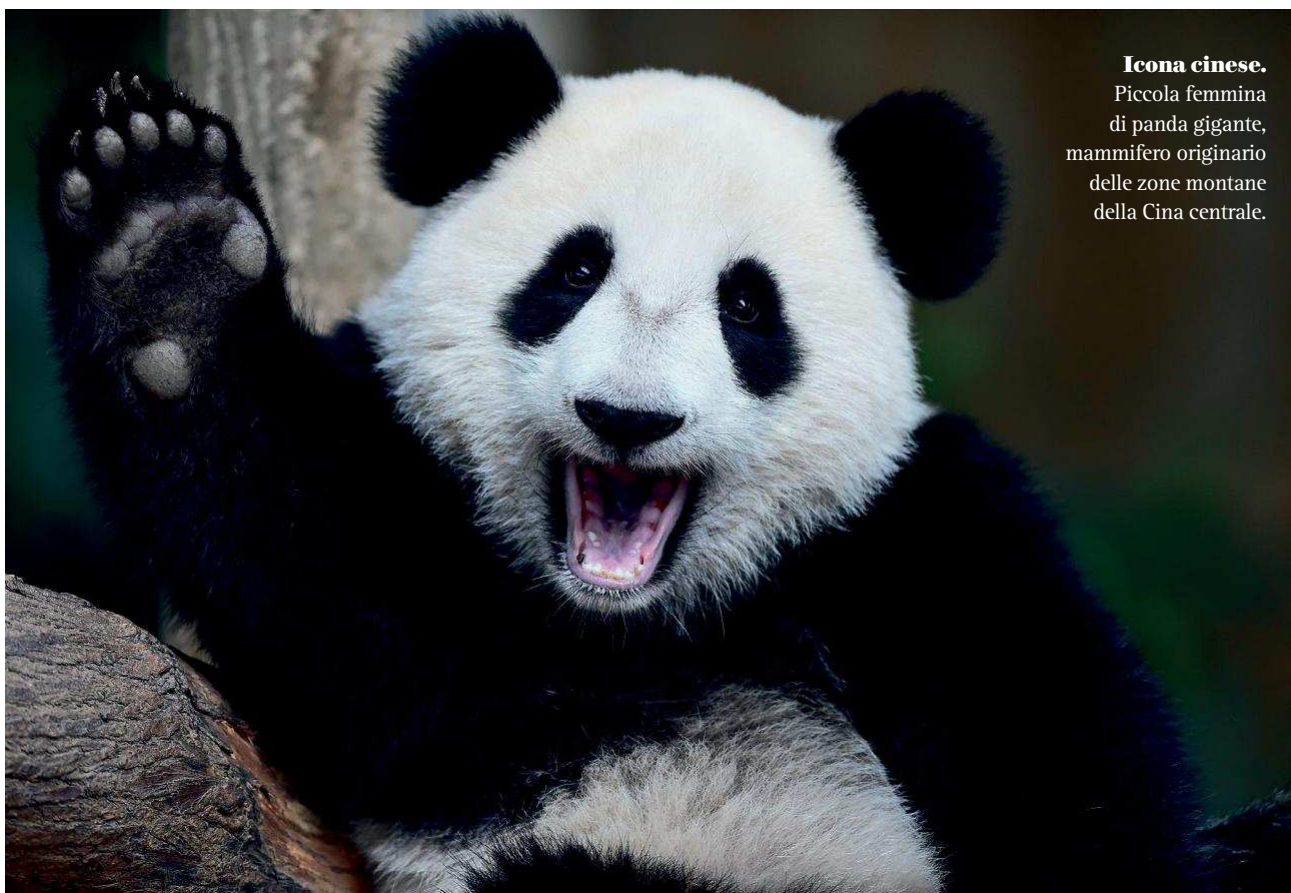
Finora però le analisi biogeografiche sono rimaste spesso molto descrittive. In genere i vari studi descrivono le differenze tra le diverse aree, identificando le specie più caratteristiche dell'una o dell'altra regione, e propongono le posizioni delle frontiere biogeografiche e di eventuali aree di transizione. Ma perché ci sono differenze così forti tra la fauna della Cina e quella dell'India? Perché non ci sono canguri in Europa, scimmie in Nord America o salamandre in Africa centrale? Perché la frontiera tra due regioni segue un determinato tracciato e non passa 2000 chilometri più a nord o più a sud?

I biogeografi si sono spesso posti queste domande, ma finora le analisi sono state limitate a piccole aree o a poche specie. Mancava un'analisi complessiva, che cercasse di identificare i fattori

Peter Macdiarmid/Getty Images

Dal Brasile. In Nord America non ci sono scimmie, ma il Sud America ne ospita numerose specie, come il leontocebo dalla testa dorata.

Una questione di confini

La mappa in alto mostra le regioni biogeografiche del mondo e i rispettivi confini. Qui accanto la similarità tra le regioni biogeografiche. Le sottoregioni più simili possono essere raggruppate in regioni e macroregioni. Le regioni sono state raggruppate sulla base della distanza filogenetica, che misura la profondità delle differenze evoluzionistiche. Se le specie presenti in due regioni sono strettamente imparentate tra loro, la distanza sarà minore rispetto a quella tra aree che hanno specie lontanamente imparentate. Le linee rosse rappresentano il punto in cui le sotto regioni si raggruppano in regioni e macroregioni.

Danilo Sossi su indicazione dell'autore, fonte: *An Update of Wallace's Zoogeographic Regions of The World*, di Holt B. e altri, in «Science», Vol. 339, n. 6115, pp. 74-78, 4 gennaio 2013 (*mappa*)

Icona cinese. Piccola femmina di panda gigante, mammifero originario delle zone montane della Cina centrale.

che determinano i limiti delle regioni biogeografiche a scala globale. Inoltre non dobbiamo dimenticare che queste regioni hanno una struttura gerarchica, visto che all'interno di ogni macroregione possiamo trovare un certo numero di regioni e sottoregioni. I fattori che determinano le divergenze faunistiche maggiori (tra macroregioni) sono gli stessi che determinano le differenze più deboli (tra sottoregioni)?

Circa due anni fa, con alcuni colleghi dell'Università di Grenoble, ho cominciato a ragionare su queste domande, cercando una strategia per identificare quali fattori determinino le divergenze tra aree biogeografiche. Fortunatamente nel 2013 Ben G. Holt, biologo dell'Università di Copenhagen, aveva pubblicato su «Science» carte biogeografiche particolarmente complete, basate sui dati di tutte le specie di mammiferi, uccelli e anfibi (oltre 20.000 specie), che consideravano la divergenza evoluzionistica tra le specie. Inoltre negli ultimi anni si sono rese disponibili grandi banche di dati geografici, che descrivono nel dettaglio clima, orografia e storia geologica di tutto il pianeta.

Quattro processi

L'isolamento causato da mari e oceani è spesso la causa più ovvia per le differenze biogeografiche. In effetti, tra le aree più divergenti troviamo la regione australiana e il Madagascar: gli oceani che circondano l'Australia sono la spiegazione più ovvia per l'incredibile divergenza della fauna di questa regione. Le analisi da noi effettuate si sono però concentrate sulle frontiere biogeografiche che attraversano i continenti, perché in questo caso i processi alla base della divergenza biogeografica sono assai più controversi. Abbiamo considerato quattro processi principali: sebbene siano già stati proposti per una o più frontiere biogeografiche, mancava un quadro d'insieme, che considerasse tutte le frontiere biogeografiche contemporaneamente.

Il primo processo che abbiamo ipotizzato è l'esistenza di barriere climatiche. Ogni specie è adattata a un clima specifico, e il limite della sua distribuzione è spesso causato da climi non favorevoli. A nord, le aree di distribuzione geografica delle specie, ovvero gli areali, di molti animali non si possono spingere dove le temperature sono troppo basse per le loro esigenze fisiologiche. Allo stesso modo un clima troppo arido, troppo piovoso o con differenze stagionali troppo intense possono rendere un'area non idonea per una specie, limitandone la distribuzione. Abbiamo quindi ipotizzato che dove il clima (temperature o precipitazioni) cambia fortemente tra aree geografiche vicine si formino «barriere climatiche» che possono determinare le frontiere biogeografiche.

Il secondo processo sono i cambiamenti climatici passati. Durante le ultime centinaia di migliaia di anni il clima ha subito notevoli cambiamenti. A partire da 21.000 anni fa, ovvero con la fine dell'ultimo massimo glaciale, sono avvenuti cambiamenti particolarmente forti. La fine delle glaciazioni ha permesso a molte specie di spostarsi verso nord, colonizzando le aree prima occupate dai ghiacci. Alcune frontiere biogeografiche potrebbero corrispondere ad aree in cui sono entrate in contatto faune diverse, che hanno ricolonizzato le regioni lasciate libere dai ghiacci partendo da aree rifugio diverse.

Il terzo processo possibile è la tettonica. L'attuale distribuzione dei continenti è il risultato di imponenti movimenti tettonici. Negli ultimi 60 milioni di anni i continenti hanno notevolmente cambiato la loro posizione, e alcune aree attualmente a contat-

Le cause delle separazioni

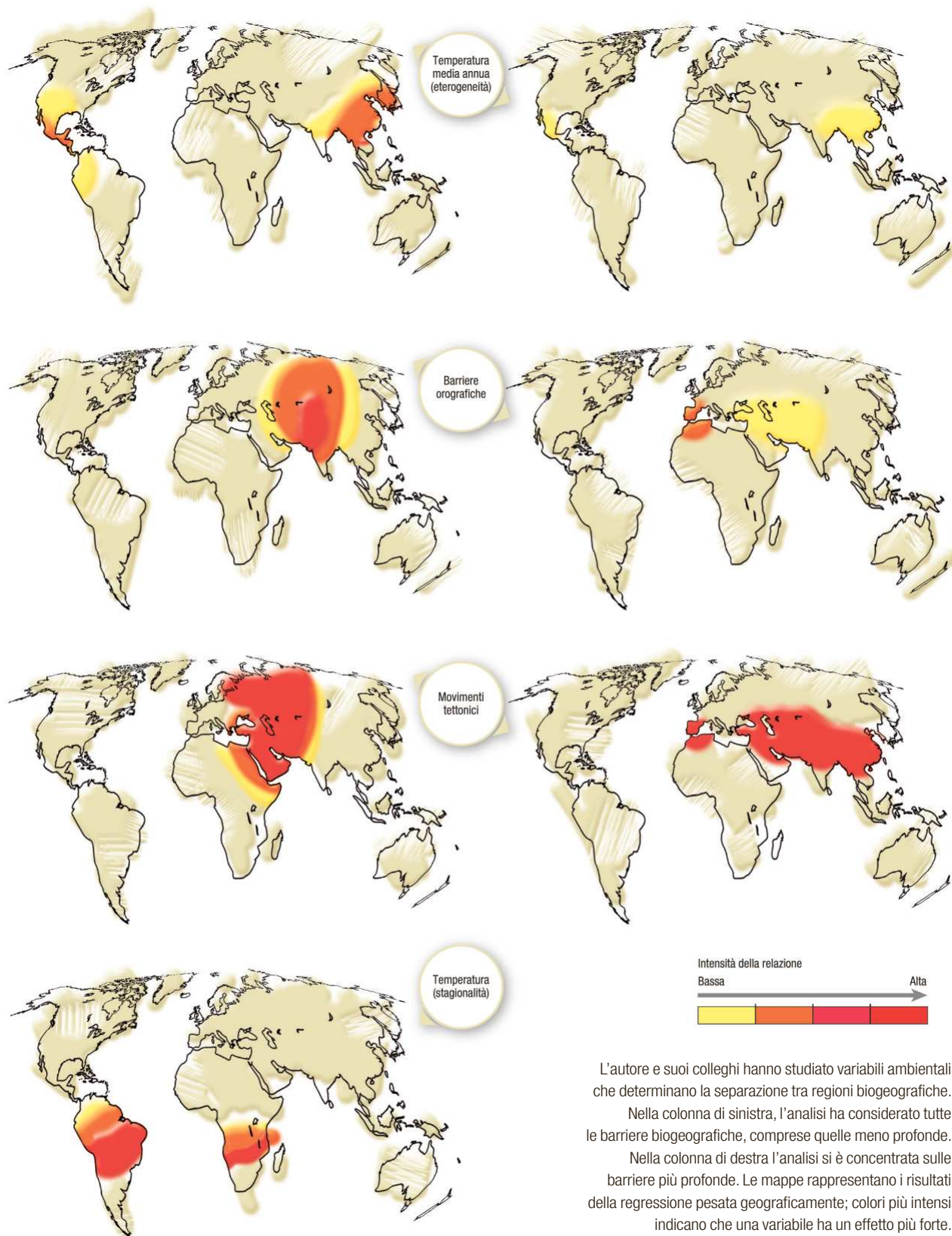
Temperatura media annua (eterogeneità)

Barriere orografiche

Movimenti tettonici

Temperatura (stagionalità)

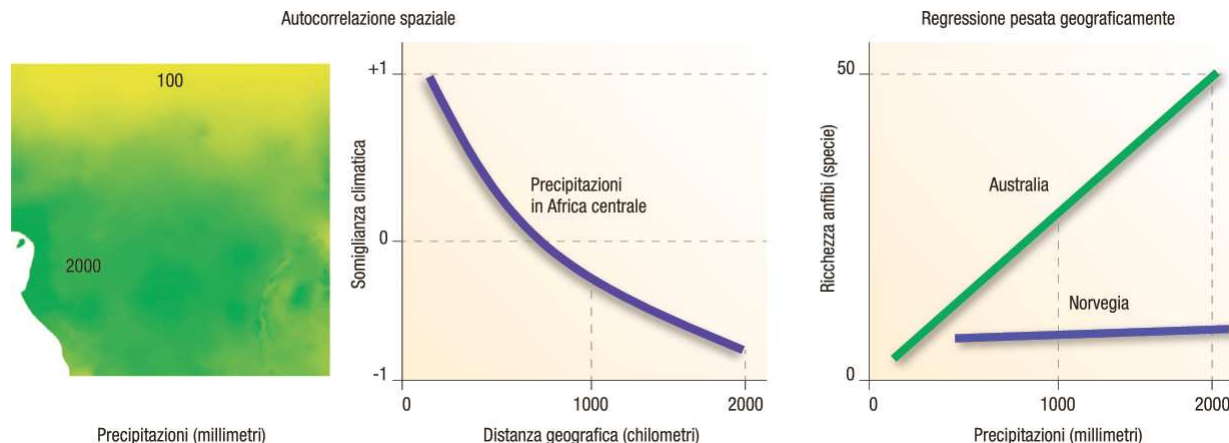
Intensità della relazione

Bassa — Alta

L'autore e suoi colleghi hanno studiato variabili ambientali che determinano la separazione tra regioni biogeografiche. Nella colonna di sinistra, l'analisi ha considerato tutte le barriere biogeografiche, comprese quelle meno profonde. Nella colonna di destra l'analisi si è concentrata sulle barriere più profonde. Le mappe rappresentano i risultati della regressione pesata geograficamente; colori più intensi indicano che una variabile ha un effetto più forte.

Danilo Sossi su indicazione dell'autore; fonte: *Global Determinants of Zoogeographical Boundaries*, di Ficetola G.F. e altri, in «Nature Ecology & Evolution», Vol. 1, articolo n. 0089, 6 marzo 2017

Relazioni per dati espliciti

Autocorrelazione spaziale

Regressione pesata geograficamente

Normalmente le analisi statistiche, come la regressione, assumono che le osservazioni siano indipendenti. Questo non è vero però per i dati spazialmente espliciti, che descrivono la presenza di specie o habitat nello spazio. Innanzitutto, due punti geograficamente vicini hanno condizioni ambientali (per esempio clima e vegetazione) più simili rispetto a punti lontani migliaia di chilometri. Questo fenomeno (autocorrelazione spaziale) deve essere considerato tramite modelli spazialmente espliciti. Inoltre le relazioni possono essere non omogenee tra aree geografiche. Per esempio, abbondanti precipitazioni favoriscono la ricchezza di anfibi in Australia, mentre in Norvegia le comunità di anfibi resteranno povere anche nelle aree più piovose, come mostrato nell'esempio qui sopra. La regressione pesata geograficamente permette di visualizzare questa eterogeneità.

to sono rimaste separate per decine di milioni di anni. Abbiamo quindi ipotizzato che le frontiere biogeografiche possano coincidere con le aree in cui i movimenti tettonici durante gli ultimi 60 milioni di anni sono stati più rapidi.

Infine, non abbiamo dimenticato il ruolo delle barriere orografiche. Le catene montuose restano una barriera difficile da superare per tutti gli animali terrestri, soprattutto per le specie non volatrici. Queste barriere potrebbero essere quindi alla base di molte frontiere biogeografiche.

Dove e perché

Distinguere tra queste ipotesi non è stato facile. In realtà possiamo immaginare che questi processi agiscano insieme, anche perché non sono indipendenti. I movimenti tra i continenti contribuiscono a creare catene montuose, e a loro volta le catene montuose influenzano la circolazione atmosferica, modificando il clima. Abbiamo quindi investito una quantità di tempo considerevole nell'identificare metodi statistici che permettessero non solo di valutare l'importanza di questi processi, ma anche di visualizzare dove sono più importanti (*si veda il box in questa pagina*).

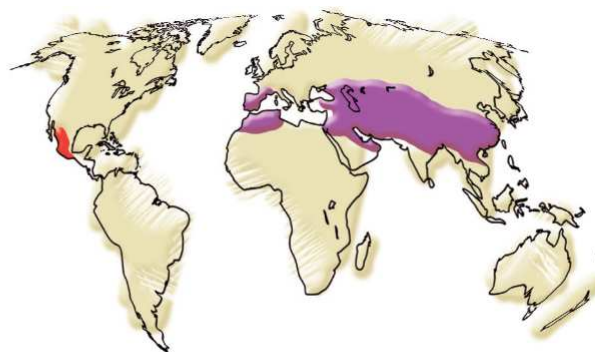
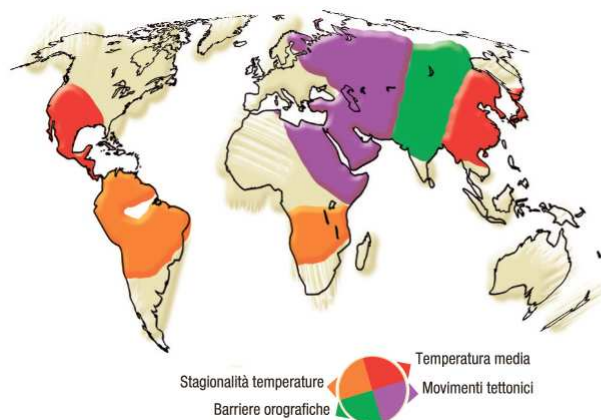
Se consideriamo tutte le frontiere biogeografiche che attraversano i continenti, è evidente che sia le barriere climatiche sia quelle tettoniche e orografiche hanno un ruolo, ma la loro importanza è molto variabile tra le diverse frontiere. Viceversa, le nostre analisi globali non hanno dimostrato un ruolo per i cambiamenti climatici avvenuti dopo la fine delle glaciazioni.

Le attuali differenze climatiche tra aree geografiche spiegano soprattutto le frontiere che rappresentano divergenze meno profonde. La transizione tra la regione amazzonica e quella sudamericana è un'esempio di frontiera poco profonda: diverse specie, per esempio capibara e formichieri, vivono in entrambe queste due sottoregioni, e molte specie amazzoniche sono strettamente imparentate con specie che vivono nel resto del Sud America. La frontiera tra queste due regioni è dettata dall'insorgere della stagionalità: se nell'area amazzonica le temperature sono quasi costanti durante l'anno, in aree più meridionali appare una stagionalità, e questo corrisponde alla transizione dalla foresta tropicale ad aree di savana. Una transizione simile si osserva in Africa. Anche qui, il limite della regione guineo-congolese, dominata dalle foreste tropicali, coincide con l'aumentare della stagionalità.

Le differenze climatiche contribuiscono anche a mantenere separate faune che sono restate isolate per milioni di anni. Per esempio il Sud America è entrato in contatto con il Nord America circa 12 milioni di anni fa, evolvendo una fauna diversa da quella degli altri continenti. Ancora oggi la fauna dell'America Latina (neotropicale) resta ben differenziata da quella del Nord America (paleartica), ma la frontiera tra queste due regioni è piuttosto sfumata. Inoltre la transizione biogeografica più forte non sembra corrispondere al punto di contatto tra le placche continentali (istmo di Panama), ma è localizzata 2000 chilometri più a nord, in Messico. I biogeografi discutono da decenni la posizione e le cause di questa frontiera, e alcuni considerano la regione a nord di Panama come un'ampia fascia di transizione tra la fauna neotropicale e quella paleartica. I nostri dati suggeriscono che in questo caso è il clima a mantenere l'isolamento tra faune, visto che la frontiera corrisponde alla regione in cui le temperature passano da tropicali a subtropicali. Le barriere climatiche sono però molto meno nette di quelle tettoniche o orografiche, e questo determina le frontiere biogeografiche sfumate di quest'area.

Gli effetti delle barriere tettoniche sono profondamente diversi da quelli delle barriere climatiche perché in questo caso le frontiere biogeografiche sono assai più forti e nette. La separazione delle placche continentali nel passato ha determinato lunghi periodi di isolamento, che hanno portato all'evoluzione di una fauna e

Danilo Sossi su indicazione dell'autore

Le variabili più importanti

Le variabili ambientali più importanti nel determinare la separazione tra regioni. A sinistra per tutte le barriere, a destra per le più profonde.

una flora distinte. Per esempio l'India è rimasta isolata dall'Eurasia molto a lungo, fino a 20-25 milioni di anni fa secondo le stime proposte dal geologo Douwe van Hinsenbergen dell'Università di Oslo. Anche in questo caso si è sviluppata una fauna con caratteri unici e un gran numero di gruppi endemici. Quando l'India è entrata in contatto con gli altri continenti, però, sono emersi altri processi, che hanno limitato il rimescolamento delle faune. La collisione tra India ed Eurasia ha infatti portato alla formazione delle imponenti catene montuose dell'Himalaya, che sono una formidabile barriera alla dispersione. Questa barriera sembra essere anche una delle frontiere biogeografiche più forti e più nette, identificata in passato con chiarezza da ricercatori che hanno lavorato su un gran numero di gruppi tassonomici.

A scala globale, una delle frontiere biogeografiche più nette è quella che separa l'area settentrionale dell'Eurasia (paleartico) dalle macroregioni tropicali e subtropicali di Africa e Asia. Questa frattura coincide con un'area in cui tre dei processi da noi proposti (tettonica, orografia e clima) agiscono insieme, rinforzandosi a vicenda. I movimenti tettonici hanno portato a contatto faune che sono rimaste a lungo isolate, e la collisione tra le placche ha dato origine a catene montuose che impediscono la dispersione. Viceversa, in assenza di precedenti barriere tettoniche il ruolo delle catene montuose sembra piuttosto limitato. Infine, queste grandi catene montuose, orientate da est a ovest, separano climi estremamente diversi. Muovendosi dall'India verso nord si passa da climi tropicali e subtropicali ai deserti freddi dell'Asia centrale, e questo evidentemente contribuisce alle differenze faunistiche.

Verso l'omogeneizzazione?

Le regioni biogeografiche sono il risultato di processi durati decine di milioni di anni, durante i quali evoluzione, geografia ed eterogeneità ambientale hanno interagito per formare l'immensa varietà che osserviamo attraversando i continenti. Tuttavia, negli ultimi secoli le attività umane stanno modificando la struttura biogeografica con una velocità senza precedenti. Innanzitutto, l'uomo trasporta specie animali e vegetali in tutto il pianeta, facendo superare barriere geografiche ed ecologiche, permettendo di raggiungere aree che non avrebbero mai potuto essere colonizzate. In molti casi gli esseri umani hanno introdotto le specie volontariamente, per esempio i conigli europei in Australia e in Sud America, o le testuggini nordamericane in Europa. Ancora più spesso, gli animali hanno viaggiato come clandestini: è così che i ratti e la zanzara tigre si sono diffusi in tutto il mondo. Queste invasioni provocano danni economici ingenti, ma causano anche un notevole declino della biodiversità. Molte specie native si stanno estinguendo a causa dell'introduzione di predatori o competitori provenienti da altre aree del mondo. Inoltre, la diffusione delle specie aliene sta rapidamente smussando le differenze faunistiche tra le diverse aree geografiche, portando a un'omogeneizzazione faunistica globale. Stiamo quindi perdendo l'eterogeneità di specie tra aree geografiche, che costituisce una delle componenti chiave della biodiversità.

Purtroppo le proiezioni per il futuro non sono ottimistiche. Da una parte il numero di specie invasive sta aumentando rapidamente per l'accelerazione degli scambi commerciali a scala globale. Inoltre molte specie stanno modificando i loro areali in risposta ai cambiamenti climatici attuali, per esempio spostandosi verso aree più settentrionali. Poiché le differenze climatiche sono alla base della diversità di specie tra aree geografiche, se non riusciamo a limitare il cambiamento climatico ci possiamo aspettare sconvolgimenti nella distribuzione delle specie, con conseguenze difficili da prevedere in termini di biodiversità e di funzionamento degli ecosistemi.

È ancora possibile intervenire, sia per limitare l'espansione delle specie aliene sia per limitare il riscaldamento globale, ma dobbiamo agire rapidamente, perché solo una risposta più rapida può limitare le conseguenze dei cambiamenti globali in corso. ■

PER APPROFONDIRE

Global Determinants of Zoogeographical Boundaries. Ficetola G.F. e altri, in «Nature Ecology & Evolution», Vol. 1, articolo n. 0089, 6 marzo 2017.

An Update of Wallace's Zoogeographic Regions of The World. Holt B. e altri, in «Science» Vol. 339, n. 6115, pp. 74-78, 4 gennaio 2013.

Greater India Basin Hypothesis and a Two-Stage Cenozoic Collision between India and Asia. van Hinsbergen D.J.J. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 109, n. 20, pp. 7659-7664, 15 maggio 2012.

The Geographical Distribution of Animals. Wallace A.R., Cambridge Library Collection, 2011.

Sito web dell'International Union for Conservation of Nature, permette di accedere alle carte di distribuzione di oltre 28.000 specie di vertebrati: **http://www.iucnredlist.org.**

ECCO
PERCHÉ
NEMO
SI
PERDE

SCIENZE MARINE

L'acidificazione degli oceani potrebbe alterare il comportamento degli animali marini in maniera catastrofica

di Danielle L. Dixson

I pesci pagliaccio (sì, proprio Nemo) vivono la vita adulta nascosti tra i tentacoli protettivi di un anemone di mare sulla barriera corallina. Tra nascita e maturazione, però, devono compiere un viaggio pericoloso. Dopo la schiusa dell'uovo, la larva (una versione minuscola del pesce, solo parzialmente formata) si allontana dalla barriera inoltrandosi in mare aperto, presumibilmente per sfuggire ai predatori, e porta a termine il proprio sviluppo.

Dopo la maturazione, che dura da 11 a 14 giorni, il pesce ritorna verso la barriera, per cercare un anemone e sceglierlo come casa. Ma mentre si avvicina deve superare forche caudine fatte di tante creature, come labridi e pesci scorpione, in agguato tra gli anfratti della scogliera, che cercano di nutrirsi dei piccoli pesci. La maggior parte riesce a evitare i predatori grazie all'olfatto.

Il senso dell'olfatto è pura chimica in azione: rilevazione, riconoscimento e risposta a molecole nell'acqua. La minima variazione della composizione chimica dell'acqua può alterare questo delicato meccanismo di sopravvivenza. Gli scienziati stanno indagando su che cosa potrebbe succedere quando l'acqua diventa più acida, una tendenza osservata nei mari di tutto il mondo, dovuta all'alto tasso di assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera. Nel 2010, insieme ai miei colleghi, abbiamo messo 300 larve di pesce pagliaccio in una vasca di acqua di mare, in laboratorio, e le abbiamo osservate per giorni. Quando abbiamo introdotto l'odore di un pesce non predatore, i pesci pagliaccio non hanno reagito. Ma quando abbiamo introdotto l'odore di un predatore (una specie di *Lotella*) si sono subito allontanati.

Abbiamo poi ripetuto l'esperimento con 300 nuove larve, figlie degli stessi genitori, ma in acqua più acida, con un pH simile a quello che si potrà trovare in certe parti dell'oceano verso il 2100 se la tendenza attuale continua inalterata. I giovani pesci si sono sviluppati normalmente, però non hanno reagito all'odore del predatore. In verità preferivano avvicinarsi all'odore pericoloso, piuttosto che all'acqua di mare inodore. Quando abbiamo introdotto contemporaneamente l'odore sia di un predatore sia di un pesce innocuo, sembravano incapaci di decidersi, e si avvicinavano ora a un odore ora all'altro. Percepivano i segnali chimici, ma non riuscivano a decifrarne il significato. Questa modifica comportamentale è stata sorprendente e preoccupante. Avevamo il sospetto che l'acidificazione potesse influenzare la segnalazione chimica, ma non pensavamo che potesse spingere un pesce verso la morte imminente.

Gli animali in generale hanno tre compiti nella vita: trovare cibo, riprodursi ed evitare di diventare cibo. In posti come la barriera corallina, dove predatori e prede popolano un complesso habitat limitato nello spazio, la selezione naturale favorisce comportamenti che evitano i predatori. Qualunque turbamento di questa abilità potrebbe avere conseguenze catastrofiche per l'ecosistema.

Se l'acqua troppo acida interferisce con l'olfatto dei pesci pagliaccio, potrebbe anche avere effetti su altri sensi e comportamenti. E sebbene lo studio abbia riguardato solo una specie di pesci pagliaccio, l'olfatto è cruciale per una vasta gamma di organismi marini. Confusione e disorientamento potrebbero aggiungere un elemento di pressione su specie già in difficoltà per aumento della temperatura dell'acqua, pesca eccessiva e cambiamenti nell'approvvigionamento alimentare. Inoltre, se molti abitanti del mare iniziano a comportarsi in maniera anomala, reti alimentari, rotte migratorie ed ecosistemi potrebbero rovinarsi irreparabilmente. Sebbene gli studi siano ancora agli inizi, i risultati puntano nella stessa direzione: l'acidificazione delle acque sta mandando i pesci in confusione.

La sfida acida

A partire dalla rivoluzione industriale la concentrazione atmosferica di anidride carbonica è salita da 280 parti per milione (ppm) a poco più di 400 di oggi. Questo numero sarebbe molto più alto senza l'assorbimento, da parte del mare, di una proporzione dal 30 al 40 per cento della CO_2 presente nell'aria. Una maggiore concentrazione di CO_2 nell'acqua del mare causa reazioni chimiche che aumentano l'acidità, cioè diminuiscono il pH. L'acqua di superficie è circa il 30 per cento più acida oggi rispetto alla fine dell'Ottocento, e se le emissioni di anidride carbonica continuano allo stesso ritmo fino alla fine di questo secolo l'acqua potrebbe diventare quasi il 150 per cento più acida di allora.

L'eccesso di CO_2 distrugge calcite e aragonite, due minerali essenziali per conchiglie e scheletro esterno di varie creature marine. Crostacei, ricci e plancton allevati da altri ricercatori in acqua con un elevato tasso di CO_2 hanno sviluppato esoscheletri incompleti o deformi. Gli scienziati però pensavano che i pesci e altri organismi senza scheletro esterno potessero sfuggire agli effetti dell'acidificazione, in parte anche perché le prime ricerche, negli anni ottanta, avevano mostrato l'incredibile abilità di certi animali di regolare la propria chimica interna, aumentando o riducendo l'ammontare di bicarbonato e cloro nel proprio corpo. Ma quegli studi esaminavano solo la fisiologia: se un animale riuscisse o meno a sopravvivere in acqua molto acida. Mantenere le normali funzioni, come trovare cibo ed evitare il pericolo, è un'altra storia. Il nostro gruppo è stato uno dei primi ad affrontare la domanda successiva: l'acidificazione altera il comportamento?

Odori e suoni che confondono

Il nostro esperimento con i pesci pagliaccio suggerisce che l'acidificazione modifica il comportamento animale, ipotesi preoccupante confermata in studi successivi. In genere molti predatori della barriera vanno a caccia di cibo durante il giorno, dunque i giovani pesci pagliaccio, di ritorno alla barriera, tendono a viaggiare di notte, quando i predatori sono addormentati, o sonnolenti, preferibilmente con poca luce lunare. Ma per un pesce piccolo come un francobollo orientarsi in mare aperto, senza riferimenti, non è facile, e quindi usa i suoni prodotti dagli abitanti della barriera come guida. Un anno dopo il nostro esperimento sull'olfatto, ci siamo concentrati sugli effetti dell'acidificazione sull'udito.

Abbiamo studiato giovani pesci pagliaccio mettendoli dentro una scatola in una vasca piena d'acqua marina. Quando abbiamo trasmesso suoni della barriera diurna (che normalmente avrebbero cercato di evitare), i pesci hanno cercato di allontanarsi. Ma quando abbiamo esaminato altri pesci, che avevano passato la loro breve vita in acqua il 60 per cento più acida (un livello che potremmo aspettarci di trovare nel 2030) non erano così timorosi. Più di metà, in realtà, era attratta dai suoni diurni.

Abbiamo ripetuto l'esperimento altre due volte, con acqua il 100 per cento e il 150 per cento più acida, livelli che si potrebbero verificare intorno al 2050 o 2100, rispettivamente. In entrambe le situazioni i pesci passavano il 60 per cento del tempo attaccati all'altoparlante che emetteva il suono della barriera di giorno. Abbiamo fatto anche esperimenti per assicurarci che nessun pesce fosse sordo (non lo erano). In condizioni di alta acidità, i pesci pagliaccio non riconoscevano il significato dei segnali uditivi.

Danielle L. Dixson è *assistant professor* di scienze e politiche marine all'Università del Delaware. Studia gli effetti dei cambiamenti climatici e del degrado dell'habitat sul comportamento degli organismi marini.

Un abitante dell'oceano con i cinque sensi in confusione non eviterà i predatori. Ma potrebbe anche verificarsi l'effetto speculare: forse non riusciranno a trovare cibo in modo efficiente.

Gli squali, come è noto, hanno un fortissimo senso dell'olfatto, su cui si basano per orientarsi, trovare un compagno e individuare prede. Data la confusione sensoriale verificatasi nei pesci pagliaccio, ci siamo chiesti come avrebbero reagito gli squali all'acqua acida. Abbiamo catturato 24 piccoli squalidi adulti, che dalla costa vicino a Woods Hole, in Massachusetts, erano migrati nelle acque temperate tra le due Caroline e il New England meridionale. Li abbiamo divisi in tre gruppi, mettendo ogni gruppo in una piccola vasca rotonda. Gli squali nel primo gruppo nuotavano in acqua prelevata dall'oceano vicino a Woods Hole. Il secondo gruppo nuotava in acqua con un tasso di acidità simile a quello previsto per l'anno 2050 e quelli del terzo gruppo in acqua simile a quella del 2100. Allo stesso tempo ci siamo procurati una «sciacquatura di calamaro», lasciando calamari a mollo nell'acqua di mare e poi filtrando l'acqua (agli squali piacciono tanto i calamari).

Dopo cinque giorni abbiamo fatto nuotare ciascuno squalo in una vasca lunga 10 metri e larga 2, con acqua acida come quella in cui avevano vissuto fino a quel momento. La vasca rettangolare aveva due rubinetti, da ciascuno usciva un piccolo flusso d'acqua, e ogni flusso scorreva lungo uno dei due lati lunghi della vasca. Da uno dei rubinetti usciva acqua con odore di calamari.

Con telecamere e programmi abbiamo registrato gli eventi successivi. Gli squali del primo gruppo (acqua normale) passavano circa il 60 per cento del tempo nuotando nel flusso d'acqua con l'odore di calamari. Quelli del secondo gruppo facevano lo stesso. Ma gli squali del terzo gruppo lo evitavano di proposito, e passavano solo il 15 per cento del tempo nel flusso d'acqua con l'odore di calamari. Abbiamo osservato anche altre differenze. Gli squali del primo gruppo colpivano e mordevano un mattone di fronte al rubinetto da cui usciva la sciacquatura di calamari. Lo colpivano più del doppio delle volte degli squali nel secondo gruppo, e più di tre volte tanto di quelli del terzo gruppo.

È stupefacente vedere un predatore che perde interesse, al punto di evitare l'odore del cibo. I pesci osservati in altri esperimenti mostrano comportamenti altrettanto strani. Data l'importanza degli squali, in cima alla catena alimentare del loro ecosistema, e data la loro vulnerabilità ai cambiamenti ambientali, l'acidificazione degli oceani potrebbe rappresentare una grave minaccia per questi animali e il loro habitat.

IN BREVE

Mari sempre più acidi, dovuti al cambiamento climatico, potrebbero modificare comportamenti chiave, necessari agli organismi marini per la sopravvivenza.

Gli esperimenti mostrano che pesci pagliaccio, squali e granchi allevati in acqua molto acida potrebbero non riuscire a percepire l'odore dei predatori o a trovare cibo, o potrebbero avventurarsi in luoghi pericolosi.

Non è chiaro se gli abitanti degli oceani riusciranno ad adattarsi all'acidità in aumento, se l'aumento è graduale, o se riusciranno a trasmettere comportamenti adattativi ai discendenti. Studi in siti vulcanici, naturalmente più acidi, ci daranno qualche risposta.

Illustrazione di Pascal Campion (*pagine precedenti*)

Il coraggio non è sempre positivo

È sempre problematico estrapolare i comportamenti osservati in laboratorio all'ambiente naturale. Quindi siamo andati in una laguna sabbiosa vicino a un'isola a nord della Grande barriera corallina per esaminare un altro tratto: il coraggio. In questo luogo abbiamo osservato giovani pesci damigella reagire all'odore dei predatori, dopo un'esposizione di quattro giorni ad acqua acidificata. In una vasca rettangolare, solo circa metà di quelli che avevano vissuto in acqua acida a livelli del 2050 erano attratti dal flusso d'acqua con l'odore del predatore, contro il 100 per cento di quelli esposti ad acqua acida a livelli del 2100.

Abbiamo liberato i pesci damigella vicino a una piccola barriera costruita nella laguna, dopo averli tatuati per poterli riconoscere. I pesci che avevano vissuto in acqua più acida dimostravano un comportamento rischioso: invece di rimanere vicino ai coralli per proteggersi, si avventuravano in acque aperte, in misura più frequente di quelli che non erano stati esposti all'acqua acidificata. Un ricercatore subacqueo li ha spaventati facendoli ritornare tra i coralli, ma quelli esposti ad alti livelli di CO_2 tornavano in mare aperto più velocemente degli altri. E alla fine quelli esposti ai livelli di acidità previsti per il 2100 erano divorati dai predatori in misura nove volte maggiore. I pesci esposti ai livelli di acidità previsti per il 2050 non erano così coraggiosi, ma comunque si allontanavano dalla barriera e morivano cinque volte di più.

Per gli scienziati è molto utile studiare i pesci della barriera, perché il comportamento è coerente e semplice da osservare. Ma anche gli esperimenti su altri organismi hanno mostrato comportamenti problematici. Al Monterey Bay Acquarium Research Institute hanno allevato granchi eremiti in alta acidità. I granchi non mostravano il comportamento irresponsabile dei pesci damigella; piuttosto, ci mettevano più tempo a riemergere dalla conchiglia dopo un attacco simulato (un polpo di plastica).

Altri ricercatori, in Cile, hanno studiato un mollusco (*Concholepas concholepas*) che si attacca alle rocce lungo le spiagge battute dalle onde. Di solito, quando le onde staccano il mollusco dal rifugio, vi si riattacca prontamente, in modo da non andare alla deriva e diventare una facile preda. Quando i livelli di CO_2 sono stati aumentati di circa il 50 per cento, alcuni molluschi ci hanno messo meno del solito a trovare rifugio. Altri, tenuti in acque ancora più acide, seguivano strane traiettorie, per evitare i predatori, e altri ancora nuotavano verso di essi, invece di fuggire.

L'acidificazione degli oceani confonde le creature marine. Ma come? Alcuni ricercatori si chiedono se i segnali stessi (odori e suoni) siano modificati dal pH. Ma altri esperimenti dimostrano che i pesci riconoscono i composti chimici in acqua con alta concentrazione di CO_2. Altri ipotizzano che i cambiamenti di comportamento siano la risposta confusa di pesci impegnati a regolare l'acidità del corpo, ma questa ipotesi necessita di ulteriori studi.

Seguendo un'altra intuizione, con Philip L. Munday, alla James Cook University, in Australia, abbiamo deciso di collaborare con Göran E. Nilsson, all'Università di Oslo. Secondo Nilsson, l'acidificazione interferisce con un neurotrasmettitore chiamato $GABA_A$, che modula i segnali nel cervello e nel sistema nervoso di molti animali, inclusi gli esseri umani. Il $GABA_A$ tra l'altro inibisce i segnali chiudendo il flusso di cloro e bicarbonato nella membrana dei neuroni. Quando i pesci sono esposti ad alte concentrazioni di CO_2 si liberano dal cloro, nel tentativo di accumulare più bicarbonato, e quindi riportare il pH a livelli normali. Questo cambiamento chimico eccita i recettori $GABA_A$, che mandano segnali. Quando pesci esposti ad alti livelli di CO_2 sono poi messi in acqua con gabazina, sostanza che blocca il recettore $GABA_A$, dopo soli 30 minuti mostrano un comportamento normale. Ma la sensibilità al recettore $GABA_A$ cambia da specie a specie, quindi non è chiaro se questa sia la causa principale dei comportamenti inusuali.

I pesci si adattano (forse)

La domanda principale che mi viene fatta quando parlo dell'acidificazione degli oceani è: «Quali sono le probabilità che gli animali marini riescano ad adattarsi?». La natura ha una capacità straordinaria di risanarsi. È difficile prevedere come potrebbe adattarsi un organismo, per un ecosistema complesso è quasi impossibile.

Alcuni esperimenti indicano tendenze comuni. Per esempio si osservano cambiamenti nell'olfatto solo in pesci pagliaccio giovani, ma anche in squali adulti. Sembra anche esserci un punto di non ritorno per i pesci della barriera: la metà mostrava comportamenti problematici con livelli di acidità previsti nel 2050, tutti mostravano quei comportamenti ai livelli previsti per il 2100.

Dobbiamo chiederci, però, se gli esperimenti sull'acidificazione siano affidabili o presentino altri problemi. In gran parte degli studi, i pesci sono stati allevati, o hanno vissuto, nell'acqua acidificata per pochi giorni, o mesi al massimo: un periodo molto breve. Agli animali non era data un'opportunità realistica di acclimatarsi o adattarsi. Dobbiamo studiare i pesci in natura, dove l'oceano diventa più acido in maniera graduale.

Per approfondire gli studi, gli scienziati hanno esaminato le barriere coralline vicino ai vulcani, dove i gas vulcanici filtrano attraverso le rocce e l'anidride carbonica affiora in punti precisi sul fondo della barriera, acidificando le acque a livelli simili a quelli previsti per il 2100. Quando abbiamo osservato le barriere vulcaniche a Papua Nuova Guinea, abbiamo scoperto che i giovani pesci damigella in uno di questi punti erano attratti dai predatori, non distinguevano tra l'odore di predatori e non predatori, e avevano comportamenti più avventurosi: gli stessi cambiamenti comportamentali mostrati dai pesci in laboratorio. In punti in cui non c'erano gas vulcanici acidificanti, gli stessi pesci damigella riconoscevano l'odore dei predatori e li evitavano.

Non sappiamo se il comportamento si tramandi a generazioni successive; solo ora si inizia a indagare. In uno studio, i discendenti di pesci della barriera allevati in condizioni di alta acidità, non hanno mostrato alcun vantaggio nell'adattarsi a livelli più alti.

L'acidificazione degli oceani è solo uno di molti fattori distruttivi. Pesca eccessiva, aumento della temperatura dell'acqua e dell'inquinamento, caccia di predatori in cima alla catena alimentare, come gli squali, e distruzione dell'habitat sono fattori che incidono negativamente sulla salute dei mari. Sebbene alcuni di questi, come la caccia agli squali, possano essere arginati dalle autorità locali, eventi a più largo raggio, come aumento della temperatura e acidificazione, potrebbero diventare la goccia che fa traboccare il vaso per molte specie. Mentre studiamo come questi fattori influenzano la vita degli abitanti oceanici, dobbiamo anche indagare come influenzino le loro capacità cognitive, che sono altrettanto importanti, per la sopravvivenza. ■

PER APPROFONDIRE

Behavioural Impairment in Reef Fishes Caused by Ocean Acidification at CO_2 Seeps. Munday P.L. e altri, in «Nature Climate Change», Vol. 4, pp. 487-492, giugno 2014.

Odor Tracking in Sharks Is Reduced under Future Ocean Acidification Conditions. Dixson D.L. e altri, in «Global Change Biology», Vol. 21, n. 4, pages 1454-1462, aprile 2015.

Se gli oceani diventano acidi. Doney S.C., in «Le Scienze» n. 453, maggio 2006.

I vichinghi scomparsi della Groenlandia

Prima del collasso delle loro colonie governarono l'avamposto tra i ghiacci per centinaia di anni. Nuove scoperte stanno chiarendo le cause di un declino sconcertante

di Zach Zorich

Zach Zorich è uno scrittore freelance. Nel suo ultimo articolo per «Le Scienze» ha descritto il modo in cui la costruzione delle piramidi di Giza rivoluzionò l’organizzazione della società egizia.

Nell’anno 1000 d.C., alcuni navigatori vichinghi costeggiarono la parte occidentale della Groenlandia su un’imbarcazione a sei remi, diretti verso i confini del mondo che conoscevano. Non fu certo un viaggio piacevole, perché la barca offriva poca protezione dal vento, dalla pioggia e dagli spruzzi di acqua gelida, senza contare il pericolo costante di annegamento e ipotermia.

Eppure alla fine dei 15 giorni del viaggio, descritto in un documento storico, i vichinghi approdarono sulle spiagge di quella che oggi chiamiamo Disko Bay, dove i trichechi si trascinano fuori dall’acqua per accoppiarsi e riposare. Si trattava di prede facili, le cui zanne d’avorio erano ricercatissime in Europa: le fatiche del viaggio furono così ampiamente ricompensate.

I vichinghi regnarono su questo avamposto artico per centinaia di anni, fondando due floride colonie che nel periodo più prospero erano composte di migliaia di membri, ma che scomparirono entrambe tra l’inizio e la metà del Quattrocento.

Secondo la classica spiegazione di questo declino, i vichinghi sarebbero rimasti ostinatamente attaccati al loro stile di vita europeo, anche se era inadatto al terreno roccioso e al clima freddo della Groenlandia, e avrebbero continuato a mantenere pascoli per mucche e pecore. Sempre più testimonianze archeologiche, tuttavia, indicano che le ragioni del collasso delle colonie vichinghe in Groenlandia furono molto più complesse. I vichinghi, in realtà, si allontanarono dalle tradizioni europee per adattarsi alle peculiari sfide del territorio della Groenlandia, per esempio cominciando a cacciare i trichechi. Questi adattamenti consentirono agli insediamenti di sopravvivere a cambiamenti climatici che resero l’ambiente, già di per sé difficile, ancora più ostile. Eppure nemmeno queste nuove pratiche riuscirono a proteggere i vichinghi della Groenlandia dai cambiamenti politici e culturali su larga scala che li emarginarono e che potrebbero aver rappresentato minacce molto più serie dei cambiamenti del clima.

I vichinghi non si sarebbero mai stabiliti in Groenlandia se non fosse stato per una serie di omicidi commessi dal famigerato Erik il Rosso, le cui imprese sono documentate nelle saghe islandesi. Secondo le saghe Erik e il padre erano stati piccoli proprietari terrieri in Norvegia prima di essere esiliati in Islanda a causa del loro coinvolgimento in alcuni delitti. Non avendo imparato la lezione, Erik fu nuovamente mandato in esilio, alcuni anni dopo, per aver commesso vari omicidi in occasione di conflitti con due diversi vicini. Questa volta, però, non c’era un’altra terra conosciuta dove trasferirsi, motivo per cui, sempre secondo le saghe, Erik navigò verso Occidente sapendo poco di ciò che avrebbe trovato al di là del mare che gli si stagliava dinnanzi; fu così che scoprì la terraferma che avrebbe preso il nome di Groenlandia. Alla fine del suo esilio, nel 985, Erik il Rosso ritornò in Islanda, dove insieme ad altri coloni impacchettò i propri averi in 25 imbarcazioni dirette verso la nuova terra. Soltanto 14 navi sopravvissero al viaggio.

Non è chiaro perché gli altri vichinghi decisero di stabilirsi in Groenlandia. Per molto tempo gli storici e gli studiosi di scienze sociali hanno pensato che si trattasse della loro ultima possibilità: secondo questa ipotesi, in Islanda e nelle isole Fær Øer tutta la terra da coltivare era già occupata e i vichinghi avevano un bisogno disperato di spazio in cui far pascolare le greggi. È anche possibile che siano invece caduti in una trappola propagandistica; si dice che Erik il Rosso abbia chiamato Groenlandia, ossia «terra verde», quel territorio roccioso e ricoperto dai ghiacci proprio per attirare più colonizzatori.

Una società basata sui pascoli

Sia che fossero motivati dalla più nera disperazione o dalla prospettiva del paradiso in terra, intorno all’anno 1000 i vichinghi cominciarono ad arrivare in Groenlandia dall’Islanda e dall’Europa con una prima ondata migratoria. Si insediarono nella maggior parte dei porti e dei terreni migliori, tanto che i coloni giunti più tardi dovettero costruire le proprie fattorie in aree più marginali. Una società cominciò a prendere forma nel momento in cui questi liberi agricoltori si portarono dietro le proprie famiglie per reclamare per sé le terre in cui era possibile far crescere il foraggio con cui nutrire pecore e mucche. Le fattorie si concentrarono in due regioni della costa occidentale dell’isola: il cosiddetto insediamento occidentale, circa 800 chilometri a sud dei territori di caccia dei trichechi presso Disko Bay, e l’insediamento orientale, 500 chilometri ancora più a sud rispetto al primo.

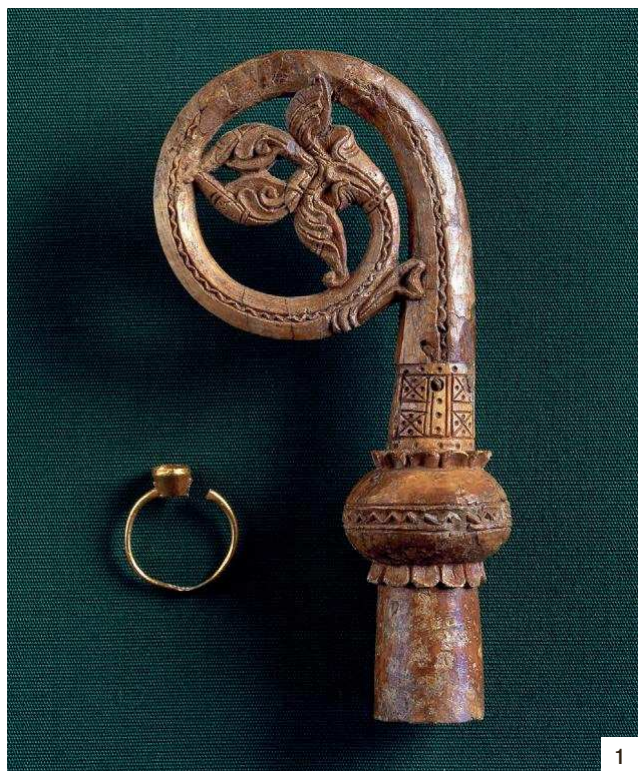
Alcune rovine scoperte a Vatnahverfi, vicino al punto più meridionale dell’isola, hanno aiutato gli archeologi a ricostruire un quadro di quello che poteva essere l’aspetto di questi insediamenti. Sembra che Vatnahverfi fosse una delle più ricche aree agricole dell’insediamento orientale. Il territorio si estende sull’oceano come le dita di una mano. Al di là delle strette spiagge di sassi, la

IN BREVE

Dopo secoli di prosperità, le colonie vichinghe della Groenlandia sono collassate di colpo.

Gli storici hanno pensato a lungo che questo declino fosse il risultato di un caparbio rifiuto di adattare i propri usi e costumi europei alle condizioni del territorio artico.

Recenti scoperte dimostrano invece che i vichinghi della Groenlandia cambiarono le proprie abitudini; dagli ultimi ritrovamenti sembrerebbe che la loro fine sia stata piuttosto determinata da una complessa interazione di forze culturali e politiche esterne.

Pagine precedenti: illustrazione di Tyler Jacobson

1

2

3

4

I manufatti svelano alcuni aspetti della vita dei vichinghi della Groenlandia. Un anello e un bastone provenienti dalla tomba di un vescovo (*1*) attestano l'influenza della Chiesa cattolica sulle colonie. I vichinghi groenlandesi mantennero stretti legami culturali con l'Europa, condividendone le mode (*2*) e le tradizioni. Ma si ritagliarono anche una propria nicchia economica grazie all'adozione di nuove pratiche, come la caccia ai trichechi, di cui esportavano le zanne d'avorio sul continente europeo, dove erano poi utilizzate per ornamenti come, forse, i famosi scacchi di Lewis (*3*). I vichinghi incontrarono gruppi di inuit che già abitavano sull'isola e avrebbero intagliato nel legno statuette che rappresentavano i nuovi arrivati (*4*).

terra è ricoperta di erba da pascolo per le pecore, oggi come all'epoca dei vichinghi. Tutto ciò che è rimasto delle antiche costruzioni sono cumuli di rocce ricoperte di muschio, la cui disposizione rivela che le fattorie erano simili a quelle costruite in Islanda e in Scandinavia: l'edificio principale situato al centro del terreno migliore e, intorno, i pascoli meno appetibili, dove le persone potevano vivere e lavorare spostando le greggi per farle pascolare nelle varie aree. Una campagna di scavo guidata da Konrad Smiarowski, studente di dottorato presso lo Hunter College, ha identificato a Vatnahverfi 47 diverse proprietà agricole organizzate in otto fattorie.

Le fattorie vichinghe si estendevano lungo regioni così ampie da necessitare la costruzione di edifici più piccoli, chiamati *shieling*, che servivano come riparo temporaneo per le greggi oppure come spazio di lavoro dove i contadini potevano mungere le mucche, tosare le pecore, lavorare la carne e i prodotti caseari. Negli ultimi 12 anni il gruppo di Smiarowski ha identificato nella regione 86 ripari; questa scoperta, insieme a quelle fatte da altri gruppi, indica che la comunità agricola di Vatnahverfi ospitava tra 250 e 500 persone circa.

Come spiega Thomas McGovern, archeologo dello Hunter College che ha lavorato in siti della Groenlandia e di altre aree del nord Atlantico fin dagli anni settanta, le fattorie stabilivano le gerarchie su cui si basava la società della Groenlandia. L'élite vichinga che possedeva le terre, secondo Jette Arneborg, del Museo nazionale della Danimarca a Copenhagen, dipendeva dal fatto che la gente non se ne andasse; i proprietari terrieri, di conseguenza, offrivano un'abitazione alle famiglie di contadini e garantivano loro l'accesso ai pascoli in cambio di una percentuale sui profitti ricavati dai prodotti agricoli. Questo sistema consentì alle colonie di prosperare fino a raggiungere, secondo Arneborg, un picco di circa 3000 residenti negli anni fra il 1200 e il 1250.

I coloni dovettero adattare tecniche note in precedenza alle circostanze specifiche dell'ambiente in Groenlandia

Adattamenti su misura

Quando le condizioni climatiche peggiorarono, cosa che accadde poco dopo l'arrivo dei coloni, i vichinghi della Groenlandia affrontarono la sfida a testa alta. Assicurare ai maiali e ai bovini abbastanza fieno per trascorrere l'inverno si rivelò un'impresa difficile, così i contadini presero ad allevare soprattutto pecore; dove i pascoli erano di qualità particolarmente scadente, passarono alle capre, animali che possono mangiare praticamente qualsiasi cosa. Il latte di pecora e di capra si sostituì al latte vaccino come elemento di base dell'alimentazione e i maiali e i bovini furono allevati in piccole quantità, soprattutto per i banchetti e il consumo da parte dei più ricchi.

Dal momento che le fattorie non producevano a sufficienza per nutrire tutti i coloni, la gente si adattò a trovare nuove fonti di alimentazione. I depositi di rifiuti lasciati dai groenlandesi rivelano che subito dopo il loro arrivo cominciarono a cacciare foche su larga scala. È probabile che i vichinghi cacciassero le foche nell'acqua aperta dei fiordi e usassero un gran numero di barche e di reti per costringere gli animali a raggrupparsi ed essere facilmente uccisi con le lance. Le prede si estesero anche ai caribù e ai trichechi, per cacciare i quali è necessario l'impegno comune di un folto gruppo di persone, con un ottimo coordinamento tra il capo e gli altri cacciatori. I vichinghi erano in una buona posizione per adottare questa nuova tecnica grazie al lavoro comunitario tipico delle fattorie, la cui organizzazione era tale da accompagnarsi a una gestione efficace della caccia e delle risorse alimentari. La caccia di gruppo, così come i cambiamenti nelle pratiche agricole, diventarono quindi un adattamento specifico all'ambiente della Groenlandia.

I vichinghi non inventarono queste strategie di sana pianta; sembra che le innovazioni descritte siano scaturite dalle competenze che si portarono dietro dall'Islanda e dalla Scandinavia. Gli ecologi definiscono questo insieme di conoscenze «sapere tradizionale ecologico», riferendosi ai comportamenti e alle tecnologie perfezionate nel corso delle generazioni grazie al contatto con l'ambiente. La caccia alla foca era praticata nel Mar Baltico e in Islanda, ma si trattava per lo più di foche appartenenti a una specie diversa da quelle della Groenlandia. I vichinghi potrebbero aver fatto esperienza della caccia al tricheco in Islanda. In entrambi i casi, i coloni dovettero adattare tecniche note in precedenza alle circostanze specifiche dell'ambiente groenlandese.

Mentre i lavoratori cercavano di capire come riempirsi la pancia, l'élite della società vichinga, i proprietari terrieri, era impegnata a trovare nuovi modi di ampliare la propria influenza. Un modo per raggiungere questo obiettivo consisteva nel costruire chiese e consacrare terra per i cimiteri. Dal momento che le fattorie erano sparse sul territorio, luoghi d'incontro situati in zone centrali erano di importanza fondamentale per la vita sociale dei coloni. Come dice Smiarowski, «dovevano essere una comunità, in un modo o nell'altro». Le chiese diventarono un modo per riunire le persone in occasione di matrimoni, funerali e normali servizi religiosi.

Avevano però anche un'altra funzione: nel 1123 la Chiesa cattolica nominò primo vescovo di Groenlandia un prete chiamato Arnald, segno del fatto che stava iniziando a considerare questa terra una risorsa economica.

Con l'aumento dei commerci fra Europa e Groenlandia, i coloni indipendenti cominciarono a cercare nuovi modi di sfruttare la situazione. Chiesero così ad Haakon IV, re di Norvegia, di rendere la Groenlandia parte del suo regno: i groenlandesi avrebbero pagato i tributi e il re avrebbe garantito che una nave avrebbe navigato alla volta della Groenlandia una volta all'anno per vendere e acquistare merci. Questi viaggi commerciali fecero sì che l'isola restasse parte dell'economia e della cultura europee e, come spiega Arneborg, il risultato fu che «i vichinghi indossavano gli stessi abiti e usavano lo stesso tipo di pettini doppi degli europei».

È possibile che navi commerciali che seguivano rotte simili a quelle attuali abbiano trasportato anche beni e persone per conto della Chiesa cattolica. Nel 1341 il vescovo di Bergen, in Norvegia, inviò sull'isola un sacerdote per stilare un elenco delle chiese e delle proprietà ecclesiastiche. Il Vaticano apprezzava gli ornamenti d'avorio; secondo Mikkel Sørensen, archeologo dell'Università di Copenhagen esperto della storia degli inuit groenlandesi, è dunque possibile che il vescovo sia stato incaricato di mantenere attiva la fornitura di questo materiale dalla Groenlandia al continente. Arneborg crede invece che la Chiesa fosse più interessata al denaro che girava intorno al traffico d'avorio che all'avorio in sé. In ogni caso, i re norvegesi controllavano quella che all'epoca per gli europei era sostanzialmente l'unica via per procurarsi il prezioso materiale. Sembra che, per oltre un secolo, questo rappor-

Legami solidi con l'Europa

I vichinghi cominciarono ad affluire in Groenlandia dall'Islanda e da altre parti d'Europa intorno all'anno 1000 d.C.; fondarono due colonie, l'insediamento orientale e l'insediamento occidentale, ma conservarono legami politici e culturali con il continente europeo. Costruirono fattorie in luoghi come Vatnahverfi usando lo stesso stile delle fattorie vichinghe ritrovate in Scandinavia e in Islanda, coltivando foraggio per le mucche e le pecore. Tuttavia furono costretti a trovare nuovi modi per procurarsi cibo e reddito. Cominciarono a pescare e a cacciare le foche e i caribù e, in aggiunta, risalirono lungo la costa occidentale su piccole imbarcazioni, fino a Disko Bay, per catturare i trichechi e le loro zanne d'avorio; il prezioso materiale, insieme alle pelli degli animali, era poi trasportato in Europa grazie a una nave che arrivava da Bergen, in Norvegia. Questo sistema funzionò bene fino a quando questi beni di lusso cominciarono a perdere interesse sui mercati europei.

Fonti: Rowan Jackson e Andrew Dugman, Università di Edimburgo (rotte commerciali)
Mappa di Michael Newhouse

to commerciale sia stato molto proficuo per tutti; sono stati trovati resti di avorio di tricheco in rovine di botteghe medievali dalla Scandinavia all'Irlanda, fino alla Germania, fatto che dimostra come la domanda si estendesse in tutta Europa.

Una crisi commerciale

Stavano però per scatenarsi cambiamenti radicali. Le analisi di carote sedimentarie del fondo marino a nord-ovest dell'Islanda mostrano che attorno al 1250 il clima cominciò a entrare in una fase che prende il nome di Piccola era glaciale. Durante questo periodo, le temperature precipitarono e i sistemi climatici divennero piuttosto irregolari: le tempeste aumentarono di frequenza e intensità, rendendo ancora più pericolosa la lunga navigazione nel tratto di oceano che separa l'Islanda dalla Groenlandia; secondo McGovern, questo potrebbe aver scoraggiato chi non voleva correre il rischio di perdere le proprie imbarcazioni.

Per quanto gli insediamenti dei vichinghi della Groenlandia siano sopravvissuti per circa altri due secoli, in passato molti studiosi hanno considerato l'inizio della Piccola era glaciale l'origine del loro declino. Secondo questi esperti, le colonie avrebbero iniziato ad andare in rovina perché non volevano adattarsi ai cambiamenti climatici oppure non ci riuscivano.

McGovern, tuttavia, non è convinto che il maltempo sia stato sufficiente ad annientare le colonie: «Intorno al 1250 ormai i groenlandesi vivevano stabilmente in quei luoghi da decenni, e la vita non era stata esattamente facile e confortevole, nemmeno dal punto di vista climatico. Avevano già attraversato periodi difficili e sapevano che, a volte, possono arrivare le tempeste e le persone possono annegare».

Contrariamente all'ipotesi secondo cui i vichinghi erano legati alle proprie vecchie abitudini, sembra invece che abbiano reagito a queste sfide in modo abbastanza efficace. Le ossa ritrovate nei depositi di rifiuti delle fattorie medievali di tutta la Groenlandia mostrano che i coloni si concentrarono ancor più sull'allevamento di pecore e capre, abbastanza resistenti da sopravvivere anche con piccole quantità di foraggio. Anche così, tuttavia, i piccoli proprietari terrieri facevano fatica a nutrire il bestiame e furono costretti a scegliere se diventare vassalli dei capi oppure vendere la propria terra e trovare nuovi modi di sopravvivere. Fu così che decisero di diventare vassalli e, almeno per un certo periodo, la cosa funzionò.

Il mondo però stava cambiando anche sotto aspetti che nulla avevano a che fare con il clima; è possibile che il destino delle colonie vichinghe in Groenlandia sia stato segnato proprio da queste complesse interazioni.

Il cambiamento più importante fu probabilmente legato al fatto che gli eventi mondiali cominciarono a danneggiare il commercio di avorio di tricheco. Fino a un certo momento, le con-

Cindy Hopkins/Alamy

Le rovine di pietra della chiesa di Hvalsey, costruita in un terreno agricolo dell'insediamento orientale, risalirebbero al XIV secolo.

tinue guerre in corso fra cristiani e musulmani in Medio Oriente avevano contribuito a rendere la Groenlandia uno dei punti nevralgici per il commercio dell'avorio: il conseguente dilagare della pirateria nel Mediterraneo aveva infatti ostacolato il trasporto in Europa dell'avorio di elefante dall'Asia e dall'Africa. Quest'ultimo diventò così più raro e di maggior valore, e il viaggio di 2800 chilometri per raggiungere la Groenlandia e il suo avorio di tricheco divenne un'opzione più proficua rispetto ai tragitti, più brevi ma molto più pericolosi, che univano l'Europa all'Asia o all'Africa. Come spiega Søren Sindbæk, professore di archeologia medievale all'Università di Aarhus, in Danimarca, quando le tensioni in Medio Oriente calarono e si riaprì il commercio con l'Africa e l'Asia, probabilmente l'attenzione dell'Europa si spostò lontano dalla Groenlandia.

Allo stesso tempo, è possibile che un cambiamento delle mode abbia provocato un calo delle richieste di avorio e di altri beni di lusso. Intorno al 1200 l'avorio smise di essere un materiale raro e ricercato per la gioielleria e altri tipi di decorazioni e perse il favore delle élite. Secondo McGovern questa tendenza si accompagnò a un cambiamento nel tipo di beni a cui erano interessati i mercati europei: si passò da beni prestigiosi come l'oro, le pellicce e l'avorio a beni di poco valore ma disponibili in grandi quantità come le balle di pesce essiccato e i rotoli di tessuto di lana prodotti in Islanda. «L'avorio di tricheco ha valore soltanto se le persone dicono che ne ha», sostiene McGovern; pesce e lana, al contrario, significano cibo e stoffa per approvvigionare gli eserciti.

Questa transizione segnò un cambiamento fondamentale nel modo di funzionare dell'economia europea. McGovern osserva che «i groenlandesi erano impantanati nella vecchia economia, mentre gli islandesi erano nella posizione di trarre vantaggio dall'espansione del commercio di prodotti di largo consumo, cosa che fecero».

L'economia della Groenlandia fu ulteriormente messa alla prova dalla strage provocata in Europa dalla peste nera, che tra il 1346 e il 1353 uccise circa un terzo della popolazione. La Norvegia fu colpita in modo particolarmente duro, perdendo il 60 per cento della popolazione; a partire dal 1369 non fu più in grado di spedire alcuna nave, impedendo ai vichinghi di vendere le loro pellicce e l'avorio di tricheco, beni per cui la domanda era già in declino.

I coloni groenlandesi erano minacciati anche nel proprio territorio, questa volta da invasori provenienti da nord. Quando Erik il Rosso aveva costruito la sua fattoria, la Groenlandia era apparentemente disabitata; è possibile che vi risiedessero popolazioni paleoeschimesi, appartenenti alla cosiddetta «cultura Dorset», ma che sarebbero state insediate in aree molto a nord della Disko Bay, fuori dalla portata dei vichinghi.

Ma più tardi, nel XII secolo, un gruppo di inuit, chiamato Thule dagli studiosi, cominciò a ridiscendere la costa su barche ricoperte di pelli, dette *umiak*, in direzione dei territori dove i vichinghi andavano a caccia di trichechi.

I Thule erano specializzati nella caccia alle balene e la loro società ruotava attorno agli umiak allo stesso modo in cui quella dei vichinghi era basata sulle fattorie. Su ogni imbarcazione, spiega Sørensen, potevano sedere circa 15 persone e il proprietario della barca assumeva il ruolo di capo. È probabile che questi inuit stessero andando a caccia di balene quando incontrarono per la prima volta i vichinghi nei territori di caccia della Disko Bay; un documento del XIV secolo chiamato *Descrizione della Groenlandia* indica che l'incontro non fu pacifico: i vichinghi accolsero infatti i

thule con il loro tipico atteggiamento diplomatico: combattendo. È però possibile che, nonostante la loro ferocia, i vichinghi abbiano perso la battaglia, dal momento che intorno al 1350 abbandonarono l'insediamento occidentale, più vicino alla Disko Bay rispetto a quello orientale. È ancora oggetto di dibattito il motivo per cui rinunciarono alle 80 fattorie presenti nell'insediamento, e all'accesso più facile ai trichechi; secondo McGovern, dato che tutti i riferimenti agli inuit groenlandesi presenti nelle saghe parlano di combattimenti, è probabile che una delle ragioni per cui i vichinghi abbandonarono quel territorio fu l'incapacità di difendersi dai Thule invasori.

Sconfitti da forze lontane

Il peggioramento del clima, i cambiamenti delle mode e della politica, la diffusione della peste e l'arrivo degli invasori costituivano nel loro insieme un problema mai affrontato prima dai vichinghi, che si trovarono così in una situazione non gestibile dal loro tradizionale sapere ecologico. Come risultato, i groenlandesi si trovarono a dover prendere decisioni difficili su come mantenere in vita la loro società. Continuare con rinnovata tenacia ad adottare strategie la cui efficacia era già stata comprovata, come la caccia comunitaria, che avevano consentito ai loro antenati di sopravvivere nelle regioni artiche? O invece sviluppare nuovi adattamenti in risposta alle nuove sfide? Secondo Arneborg e McGovern, le testimonianze archeologiche indicano che i vichinghi della Groenlandia si concentrarono sulla caccia e continuarono fino alla fine a fare ciò che aveva funzionato così bene all'inizio del periodo di colonizzazione.

I proprietari terrieri più facoltosi, addirittura, continuarono ad abbellire le proprie chiese quasi fino al momento in cui le colonie furono abbandonate, cosa che potrebbe costituire di per sé parte del problema. Secondo Marten Scheffer, matematico applicato all'università olandese di Wageningen, «quando investi in una chiesa e in altri edifici, ti leghi a un luogo».

Scheffer ha dedicato gran parte della propria carriera a costruire modelli matematici delle cause del collasso delle società. Quando una società si avvicina a un punto critico del proprio sviluppo, secondo Scheffer, diventa più lenta a riprendersi dalle avversità, anche le meno significative. Tutto ciò che aiuta la comunità a essere resiliente (il cibo, la ricchezza, la tecnologia) è disponibile in quantità ridotta, con il risultato di limitare l'adattabilità. Un altro fattore che rallenta il recupero è quello che Scheffer chiama «effetto costi sommersi», ed è legato agli edifici e agli strumenti che consentono a una società di ottenere dall'ambiente ciò di cui ha bisogno. Nel caso dei vichinghi i costi sommersi non sarebbero connessi soltanto alle barche e a tutto ciò che serviva per cacciare le foche e i trichechi, ma anche a elementi culturali che li tenevano legati all'Europa, come le nuove chiese. Gli sforzi necessari per costruire edifici e strumenti influiscono sulla probabilità che le persone riusciranno a rinunciarvi anche quando avrebbe senso farlo da un punto di vista puramente economico. «La gente tende a restare troppo a lungo nello stesso posto – sostiene Scheffer – ma alla fine se ne va. Ci vuole un sacco di tempo, ma poi si allontana in massa». Il matematico pensa che ai vichinghi sia accaduto qualcosa del genere.

Le colonie avrebbero potuto fare scelte diverse, che avrebbero consentito loro di sopravvivere? Secondo alcuni esperti, i vichinghi avrebbero dovuto adottare stili di vita più simili a quello degli inuit i quali, dopo tutto, non hanno avuto troppi problemi e hanno continuato a vivere in Groenlandia fino ai nostri giorni. Questo ragionamento, tuttavia, trascura la ragione per cui i vichinghi arrivarono sull'isola; se avessero voluto arricchirsi vendendo le pelli degli orsi polari e le zanne dei trichechi sul mercato europeo, non avrebbero certo subito il fascino dell'aspirazione, tipicamente inuit, di diventare capitano del proprio umiak. Come dice Sørensen, i vichinghi «erano ai margini del sistema europeo e, di conseguenza, per loro era molto importante essere collegati al continente grazie al commercio. Volevano essere europei a pieno titolo, pur vivendo lassù; era una questione di identità».

È possibile che, a metà del Quattrocento, non ci sia stato molto da scegliere. Anche i proprietari terrieri con le fattorie più grandi e le chiese più belle, nel momento in cui si fossero trovati di fronte alla possibilità di morire di fame o di essere uccisi in battaglia, avrebbero dovuto interrogarsi sull'opportunità di fare i bagagli, salire su una barca e tornare in Europa. Eppure questo avrebbe anche potuto rivelarsi un rimedio peggiore del male: sarebbero ritornati in un'Europa che era parte di un nuovo sistema economico, in cui non c'era posto per cacciatori di foche e trichechi. I vichinghi possono anche aver conquistato la Groenlandia ma, alla fine, sono stati sconfitti dalle forze del mondo che si trovava al di là delle sue coste ghiacciate. ■

PER APPROFONDIRE

Collasso. Come le società scelgono di vivere o morire. Diamond J., Einaudi, Torino, 2015.

The World of the Vikings. Uhall R., Thames & Hudson, 2007.

A Green and Pleasant Land? Palaeoecological Reconstructions of Environmental and Land-Use Change. Ledger P.M. e altri, in «Journal of the North Atlantic», speciale, Vol. 6, pp. 29-46, 2014.

Was it for Walrus? Viking Age Settlement and Medieval Walrus Ivory Trade in Iceland and Greenland. Frei K.M. e altri, in «World Archaeology», Vol. 47, n. 3, pp. 439-466, 2015.

Nuove realtà nucleari

Mentre l'Asia costruisce reattori atomici per produrre energia elettrica, l'Occidente fa passi indietro

Il nucleare va forte in Cina. Il paese sta costruendo 19 reattori commerciali, inclusi due dei più grandi mai assemblati. L'azienda statale russa Rosatom sta costruendo 13 reattori in cinque paesi. L'India sta sviluppando la propria filiera domestica. Nel frattempo gli Stati Uniti stanno cancellando reattori, lasciandone solo quattro in costruzione. A marzo la Westinghouse, per lungo tempo leader globale del settore, ha dichiarato il fallimento. La Francia, che per decenni si è affidata all'energia atomica, virerà sulle rinnovabili per soddisfare la nuova domanda di elettricità. La Germania spegnerà tutti i suoi reattori entro il 2022.

Se l'avanzamento della Cina proseguirà, entro dieci anni il paese avrà una capacità nucleare più grande di quella degli Stati Uniti, oggi paese leader. Il governo cinese aiuta le aziende a ottenere permessi e finanziamenti, due grandi ostacoli in Occidente. I cambiamenti nei mercati potrebbero anche spostare alleanze, per esempio con la firma di accordi tra Emirati Arabi Uniti e fornitori emergenti come Russia e Corea del Sud anziché con imprese statunitensi ed europee ormai in declino. Il Giappone potrebbe essere l'anomalia dell'Asia: a causa dell'incidente di Fukushima, ha ridimensionato i suoi piani.

Mark Fischetti

Nome del reattore	Capacità elettrica (megawatt)*
Fangchenggang 3	1000
Fangchenggang 4	1000
Fuqing 4	1000
Fuqing 5	1000
Fuqing 6	1000
Haiyang 1	1000
Haiyang 2	1000
Hongyanhe 5	1000
Hongyanhe 6	1000
Sanmen 1	1000
Sanmen 2	1000
Taishan 1	1660
Taishan 2	1660
Tianwan 3	990
Tianwan 4	990
Tianwan 5	1000
Tianwan 6	1000
Yangjiang 5	1000
Yangjiang 6	1000
Kakrapar 3	630
Kakrapar 4	630
PFBR	470
Rajasthan 7	630
Rajasthan 8	630
Baltic 1	1109
Leningrad II-1	1085
Leningrad II-2	1085
Novovoronezh II-2	1114
Rostov 4	1011
Barakah 1	1345
Barakah 2	1345
Barakah 3	1345
Barakah 4	1345
Summer 2	1117
Summer 3	1117
Vogtle 3	1117
Vogtle 4	1117
Chasnupp 4	315
Karachi-2	1014
Karachi-3	1014
Shin Hanul 1	1340
Shin Hanul 2	1340
Shin Kori 4	1340
Ostrovets 1	1109
Ostrovets 2	1109
Ohma	1325
Shimane 3	1325
Mochovce 3	440
Mochovce 4	440
Lungmen 1	1300
Lungmen 2	1300
Khmelnitski 3	950
Khmelnitski 4	950
Angra 3	1245
Olkiluoto 3	1600
Flamanville 3	1600

*Per confronto, un impianto a carbone molto grande è 800 megawatt

Grafica di Jen Christiansen; fonte: World Nuclear Association

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Il lato empatico del debunking

Per contrastare il rifiuto dei fatti scientifici bisogna fare leva anche sull'empatia

Nelle discussioni con chi sostiene tesi anti o pseudoscientifiche (dall'antivaccinismo alla negazione dei cambiamenti climatici alle «scie chimiche») capita spesso di imbattersi in un errore fondamentale: non da parte di chi rifiuta la scienza, ma da parte di chi è abituato a usare il metodo scientifico. L'errore è credere che basti fornire i dati per far cambiare idea a uno scettico e portarlo ad arrendersi di fronte all'evidenza. Non funziona.

Prendete, per esempio, la scienza dei cambiamenti climatici. I suoi concetti fondanti, come l'effetto serra, sono noti da quasi 200 anni (dai tempi di Fourier); la raccolta mondiale di dati sul clima procede da quasi un secolo ed è abbondantissima; il consenso della comunità scientifica è sostanzialmente unanime. L'idea che riversare anidride carbonica in atmosfera aumenti la temperatura del pianeta non è scienza di frontiera: è chimica di base, la stessa che tutti accettiamo e usiamo nella vita quotidiana, per far andare le nostre automobili o per lavare i panni, e sulla cui efficacia nessuno solleva dubbi. Eppure siamo ancora qui, quasi due secoli dopo, a discutere con chi afferma che il riscaldamento globale non solo non è opera umana, ma proprio non esiste e che gli scienziati fanno allarmismo per ottenere finanziamenti. Analogamente, l'efficacia dei vaccini nel debellare malattie devastanti è documentatissima, ma in molti governi e parlamenti ci sono ancora persone che la mettono in discussione.

Ma perché mostrare i dati non funziona? Non è questione di irrazionalità diffusa: tutti conosciamo persone che riteniamo razionali che tuttavia credono fermamente a qualche tesi antiscientifica. Non è neanche una questione di livello culturale o di diffusione della conoscenza scientifica: le ricerche sociologiche recenti, come quelle di Lawrence C. Hamilton della Università del New Hampshire, indicano che la polarizzazione delle opinioni su temi scientifici di questo genere aumenta all'aumentare del grado di istruzione anziché diminuire. Non dipende neanche dalla forma in cui i dati sono presentati: che siano tabelle aride, grafici colorati, cartoni animati accattivanti o memi sui *social network*, predicano comunque soltanto ai già convertiti.

Una chiave per capire questo fallimento dei dati e del *debunking* puro è una dichiarazione dell'ex presidente della commissione per l'ambiente del Senato degli Stati Uniti, James Inhofe, sul riscaldamento globale: «Ho pensato che dovesse essere vero fino a quando ho scoperto quanto sarebbe costato.» La scienza e i dati non c'entrano nulla: è fondamentalmente questione di costi o di rischi, reali o immaginati. Il costo è inaccettabile, dunque i dati non vanno accettati. Allo stesso modo, per un genitore che non ha mai vissuto i danni e i drammi delle malattie infettive il rischio (minimo, tuttavia non nullo) delle vaccinazioni può sembrare intollerabile.

Lato positivo. Parlare del boom economico generato dalle rinnovabili può aiutare a convincere le persone che considerano l'azione contro il riscaldamento globale come un rischio per l'economia.

Le ricerche effettuate da Graham Dixon della Ohio State University sembrano aver dimostrato un rimedio efficace, a giudicare dai primi risultati: identificare i motivi di fondo, non scientifici, del rifiuto dei fatti su un certo tema, e lavorare su di essi invece di fare debunking diretto (che servirà in seguito, come supporto). Per esempio, si è visto che conviene dialogare con chi teme che ridurre il riscaldamento globale soffochi l'economia parlando del boom economico generato dalle energie rinnovabili invece di assillarlo con immagini di orsi polari alla deriva: in questo modo la sua resistenza ai fatti sul riscaldamento globale si riduce. In altre parole, per fare debunking efficace non servono più dati: serve empatia.

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Depilati una volta per tutte?

Le tecniche di epilazione «permanente» non liberano per sempre dai peli superflui

«Se bella vuoi apparire, un poco devi soffrire» diceva la nonna quando le raccontavo di quanto odiassi l'idea di farmi la ceretta per poi vedere i peli rispuntare di lì a poco più rigogliosi che mai. Di tutti i trattamenti estetici, quelli per la rimozione dei peli sono i meno gratificanti. È raro trovare donne felici di depilarsi o uomini contenti di doversi radere ogni giorno. Dev'essere per questo che nell'ultimo secolo sono state sperimentate tecniche per cercare di eliminare i peli una volta per tutte.

La prima risale al 1875, quando un oculista di nome Charles E. Michel mise a punto un metodo per rimuovere facilmente le ciglia incarnite tramite una specie di elettroshock. Dopo aver infilato nel follicolo pilifero un sottile ago contenente un elettrodo e applicato la corrente, Michel si rese conto di aver «bruciato» il pelo. La tecnica, chiamata elettrolisi o elettrocoagulazione, in effetti funziona, ma non è né veloce, né indolore. L'ago deve essere inserito in ogni follicolo e la corrente lasciata «agire» per un periodo che va dai 15 secondi ai 3 minuti. Se moltiplicate questi tempi per il numero di peli che avete sulle gambe capirete perché questa tecnica non ha mai spopolato.

Per velocizzare l'operazione, sono state messe a punto, a partire dagli anni sessanta del secolo scorso, due tecniche che si basano sull'assunto di fondo dell'elettrolisi, ma usano aghi un po' particolari: in un caso un laser e nell'altro dei lampi di luce molto potenti, quella che viene chiamata comunemente «luce pulsata».

L'obiettivo di entrambe le tecniche è colpire la melanina, scaldarla e disintegrare il pelo. Per questo motivo, i candidati ideali sono le persone con la pelle chiara e i peli scuri che facilitano il lavoro dei fasci di luce nel colpire specificamente la melanina presente nei peli e non quella nella pelle. Per chi ha la carnagione scura le cose sono più complicate anche se non impossibili: è sufficiente lavorare sulla lunghezza d'onda del laser o sui filtri delle lampade per luce pulsata per ottenere dei risultati soddisfacenti.

Che cosa intendiamo, però, per risultati soddisfacenti? Spesso queste tecniche sono pubblicizzate come «permanenti» se non addirittura «definitive», ma siamo sicuri che lo siano davvero? In un articolo pubblicato sulla rivista «Lasers in Medical Science» nel 2006 sono stati riportati i risultati del confronto fra l'epilazione con luce pulsata e quella con diversi tipi di laser su un campione di 232 persone sottoposte a un numero di sessioni variabile a seconda della quantità di peli da eliminare. A sei mesi dall'ultima sessione sono stati misurati i risultati e si è visto che per tutte e tre le tecniche usate si aveva una ricrescita pari al 30 per cento. È comunque un buon risultato, che può essere migliorato sottoponendosi a sedute periodiche di «ritocco»: che però hanno un costo e non sono esenti da effetti collaterali che vanno all'eritema, alle macchie sulla pelle, fino alle ustioni nei casi più gravi. Chi ci propone l'epilazione «permanente» gioca sul fatto che nel linguaggio comune una cosa permanente è qualcosa che rimane stabile per un tempo non quantificabile e che può anche essere infinito. In realtà, in questo caso il termine sta solo a significare che la situazione è stabile per un po', ma prima o poi torna alla normalità. Non si sa per quanto, magari per sempre, ma molto più probabilmente in pochi mesi vedremo nuovamente i peli spuntare. Non per niente, la Food and Drug Administration ha stabilito che né il laser, né la luce pulsata possono definirsi «epilazioni permanenti» e, per una volta, la legislazione statunitense è più restrittiva di quella europea.

Insomma, nonostante le speranze, il proverbio della nonna continua a essere attuale: dobbiamo continuare a soffrire.

Secondo uno studio pubblicato nel 2006, a sei mesi dal trattamento con vari tipi di laser o con luce pulsata si ha una ricrescita dei peli del 30 per cento.

Oktay Ortakcioglu/iStock

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello.*

Otto tentacoli di tenerezza

Miti e realtà di alcuni trucchi per ammorbidire il polpo prima cucinarlo

Fa parte della cucina tradizionale di paesi come Portogallo, Spagna, Italia e Giappone, ma per i suoi otto tentacoli, un gioiello di bioingegneria, e le difficoltà di cottura che presenta intimorisce più di un cuoco casalingo. Il polpo (*Octopus vulgaris*) – chiamato piovra se di grandi dimensioni– è un mollusco cefalopode molto diffuso. Può pesare da 100 grammi a 25 chilogrammi ma i migliori da mangiare sono quelli di piccola taglia. Con i suoi tentacoli a doppia fila di ventose non va confuso con il meno saporito moscardino, che ha una sola fila di ventose per tentacolo, e neppure con la polpessa che a dispetto del nome non è la femmina del polpo ma una specie a parte, riconoscibile dai due tentacoli più lunghi degli altri e le ventose asimmetriche.

A causa del loro doppio ruolo i muscoli del polpo sono duri ed elastici: da un lato agiscono da supporto, non essendoci uno scheletro, dall'altro servono per il movimento e per afferrare le prede. La loro struttura interna è molto diversa da quella dei pesci: le fibre muscolari sono molto sottili e densamente impaccate, disposte a strati alternati in direzioni perpendicolari per permettere ai tentacoli di muoversi in ogni direzione.

I cefalopodi hanno più o meno la stessa quantità di collagene dei pesci ma la differenza di consistenza è abissale. I filamenti di collagene del polpo sono legati chimicamente tra di loro e quindi è molto più difficile romperli sia in cottura sia meccanicamente. I pesci infatti hanno una struttura tale da poter essere consumati anche crudi o con trattamenti termici minimi. Il polpo appena pescato invece non può essere consumato tal quale perché è assai coriaceo e va ammorbidito. E qui le cucine del mondo si sono sbizzarrite a trovare modi per farlo: c'è chi lo cosparge di rafano grattugiato, chi prima della cottura a fuoco dolce lo immerge per tre volte velocemente in acqua bollente, chi lo cuoce insieme a un tappo di sughero e chi lo sbatte violentemente sugli scogli.

Alcuni di questi trucchi sono leggende senza fondamento: aggiungere un tappo di sughero non altera la consistenza del polpo. Se lo usate, potete farne tranquillamente a meno. Una procedura efficace invece è la battitura meccanica per sfibrare i muscoli. Tradizionalmente i pescatori lo sbattevano a lungo sulle rocce in modo da rompere le fibre muscolari. Questa operazione ora è stata automatizzata dall'industria che usa macchine che battono il polpo in appositi rulli per ammorbidirlo prima di venderlo.

Un altro trattamento efficace è il congelamento: se avete acquistato un polpo fresco riponetelo in freezer per un paio di giorni. Il congelamento rompe le membrane cellulari e i lisosomi, organelli che contengono enzimi in grado di «digerire» le proteine e gli altri componenti delle cellule, ammorbidendo parzialmente il muscolo.

A questo punto si può cuocere. Il suo collagene inizia a denaturarsi a 55 °C quindi se piace la consistenza quasi cruda si può scegliere di cuocerlo per pochi minuti a questa temperatura, tagliarlo e consumarlo. A 60 °C il collagene si contrae, arricciando e indurendo i tentacoli, e inizia a sciogliersi velocemente in ambiente acquoso solo da 80 °C. Fatelo sobbollire a 80-90 °C. Dare tempi di cottura è sempre un rischio: la cosa migliore è verificare la consistenza infilando la punta di un coltello alla base del tentacolo. Se entra facilmente, il polpo è cotto. Possono servire anche più di 45 minuti, a seconda del peso.

Al punto giusto. I tempi di cottura del polpo non possono essere mai precisi: la strategia migliore è verificarne la consistenza di tanto in tanto con la punta di un coltello.

Karissa/iStock

Anche l'acqua salata pare migliorarne la consistenza e infatti in alcune vecchie ricette napoletane si aggiungeva un bicchiere di acqua di mare – le ricette moderne aggiungono invece il pomodoro – e si cuoceva a fuoco molto basso in un coccio chiuso ermeticamente. Provatelo con abbondante acqua leggermente salata invece di quella di mare: una volta ammorbidito scolatelo, tagliatelo e condite con olio, aglio, limone e prezzemolo.

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Di scacchiere, di note e di robot

"Ricapitoliamo», dice Doc. «Sì», risponde Rudy. Il monosillabo che giunge in risposta non rallegra l'aria affranta disegnata sul volto di Piotr R. Silverbrahms. E se è pur vero che il citato Silverbrahms mostra spesso un'aria affranta quando è chiamato a conversare con Rudy D'Alembert, è altrettanto vero che, di solito, la sua gaiezza è inversamente proporzionale al numero di sillabe che è costretto ad ascoltare dalla controparte; stavolta, invece, l'insolita reticenza del compagno sembra irritarlo.

«È arrivato un regalo da parte di Alice, dalla Svizzera.»

«Sì.»

«E tu sei uscito a fare compere.»

«Sì.»

«E quando sei tornato, hai deciso di riprogrammare RUDI, il Robot Ultralento Decisamente Inutile, conosciuto anche (nonostante la bella sonorità dell'acronimo) con il più verboso nomignolo di "Incapacity".»

«Sì.»

Tre asserzioni di fila, nessuna delle tre banali. Anzi, tutte e tre gravide di significato, di possibili precisazioni; tre aperture verso un dialogo chiarificante, tre autostrade verso la mutua comprensione. Tre «sì» secchi in risposta, vuoti come un tasto di pianoforte (preferibilmente quello immediatamente precedente il «do») ripetuto stolidamente, a ritmo lento. Nessun accenno di melodia, sviluppo, variazione; neppure un accenno di tema. Piotr tira un lungo, lunghissimo respiro, e riprende.

«Questi tre eventi, che possiamo considerare sostanzialmente innocui presi separatamente, si sono poi magicamente trasformati, in questo ameno giardino che lieto ci accoglie, in uno stolido robot con lucine lampeggianti, uno scatolone di dimensioni epocali con timbri delle federali poste elvetiche, e soprattutto in quattro pallet avvolti nella plastica ciascuno riportante la terrificante scritta "Attenzione: peso superiore a 100 chilogrammi" sul fianco.»

«Sì.»

«Sì?»

«Sì.»

Altro respiro, ancora più lungo. E poi un altro ancora, prima della supplica: «GC, per pietà, cambia nota, d'accordo? Mi va bene qualsiasi altra risposta, a patto che non sia l'ennesimo "sì"... accetto anche il "quarantadue" di adamsiana memoria...»

Un sopracciglio di Rudy si alza in un fremito di interesse: «Oh... e sessantaquattro?»

«Sessantaquattro?»

«Beh, se ti andava bene quarantadue... sessantaquattro mi sembra più acconcio.»

«Mi manca Alice. Fosse stata presente, a quest'ora avresti almeno un occhio nero. Mi manca anche Gaetanagnesi, che si sarebbe certo fatta le unghie sui tuoi polpacci. Ma vorrei ricordarti che sei stato tu a chiedermi di scendere qui in giardino, tu a pregarmi di aiutarti. E, visto il panorama di pacchi che spaventerebbe anche una squadra di camalli, ti suggerisco di non esaurire del tutto la mia pazienza, se davvero vuoi che ti aiuti.»

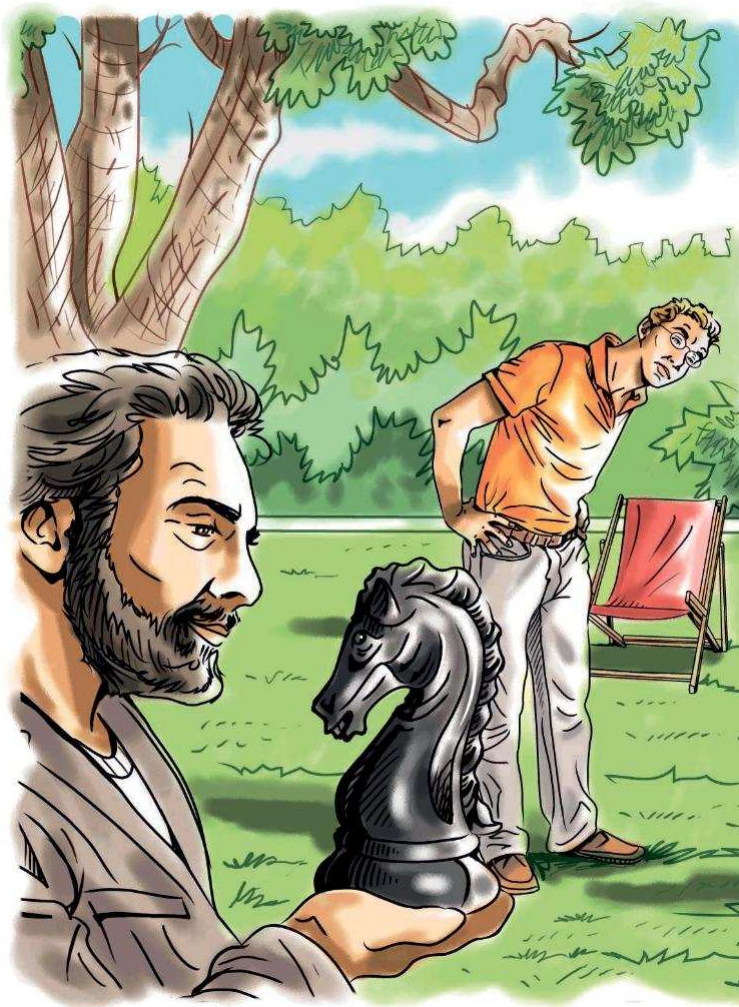



Illustrazione di Stefano Fabbri

Rudy impallidisce un po': scruta preoccupato i pallet e il pacco, poi balbetta:

«Mi... fa... re...»

«Ma mi stai prendendo in giro? Quando dicevo di cambiare nota, per la miseria, non è che volessi sentirti percorrere l'intero pentagramma!»

«No... lo so. Stavo solo per dire che "mi faresti" un piacere immenso, se mi aiutassi, in realtà. Da solo, non ce la farò mai, con tutta questa roba.»

«Oh, bene! Finalmente!», fa Piotr. «Se te ne fossi uscito con un altro monosillabo musicale, me ne sarei andato via lasciandoti nei guai: avresti dovuto chiamare dei professionisti del disimballaggio, e ti assicuro che sono cari; con il mio aiuto, quantomeno, risparmierai valsente, denaro, moneta: insomma sol-do, che se non erro sono anche le uniche due note che non hai balbettato.»

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di settembre e in forma estesa sul sito www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Nella casa dei Rudi c'è un nuovo arrivato, il Robot Ultralento Decisamente Inutile, o RUDI, coinvolto subito in un problema

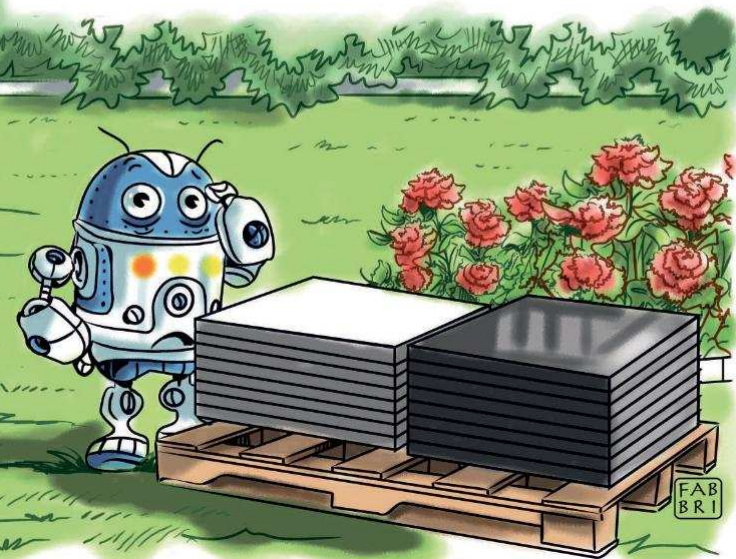
IL PROBLEMA DI LUGLIO

Il mese scorso si concionava sul numero di tram che avrebbero incontrato Alice e Piotr su due particolari linee «circolari». Ebbene, entrambi incontreranno lo stesso numero di tram: 19.

Se un tram impiega 120 minuti in una direzione e 180 nell'altra, dividiamo la circolare in 360 unità: una Circolare viaggia a 2 unità al minuto (con tram spaziati di 30 unità) mentre l'altra a 3 unità al minuto (con tram distanti 45 unità tra di loro). Quindi un tram della Circolare Geometrica (che fa il giro in 3 ore), se ha appena incontrato un tram, è separato di 45 unità dal prossimo tram che incontrerà: percorre i 2/5 di questo tragitto, mentre l'altro tram ne percorre 3/5; quindi significa che si incontrano alla fine delle 18 unità, e questo succede per tutto il percorso.

Un tram della Circolare Trigonometrica (che fa il giro in 2 ore), se ha appena incontrato un tram, è separato di 30 unità dal prossimo tram che incontrerà: percorre i 3/5 di questo tragitto, mentre l'altro tram ne percorre 2/5; quindi significa che si incontrano alla fine delle 18 unità, e questo succede per tutto il percorso.

Quindi, se la Circolare fosse divisa con 19 fermate in 20 parti, ciascuna lunga 8 unità, i tram si incontrerebbero a ogni fermata, quindi in un giro completo, passando per 19 fermate, ciascuno dei due viaggiatori incontrerebbe 19 tram.

Se invece si iniziano a contare i tram solo dopo che i due viaggiatori si sono incontrati, chi prende la Circolare Geometrica inizia a contare dai 2/5 del percorso, ossia all'ottava fermata, quindi conta 12 tram/fermate; nello stesso modo, chi prende la Circolare Trigonometrica conta 8 tram.

«No, manca anche il "la", ancora. Ma la...sciamo perdere, che è meglio.»

«Meglio. Molto meglio», concorda Piotr, spegnendo sul nascere il lampo furibondo che gli aveva acceso le pupille.

«In breve: Alice e la micia, invece di godersi le vacanze, ci hanno mandato un regalo: un set di scacchi da giardino.»

«Beh, carino, no?»

«Già. Trentadue pezzi belli grossi, dentro il grosso pacco. Ma ovviamente niente scacchiera: così ho pensato di comprare le caselle per gli scacchi. Sono nei quattro pallet.»

«Sedici "casellone" per pallet, direi.»

«Già. Le ho prese "*double face*": hanno tutte un lato bianco e uno nero. Sai, magari d'inverno un sobrio quadrato monocolore in mezzo al prato mette meno tristezza di una scacchiera abbandonata. Con l'arrivo dei primi freddi, potremo rigirare le caselle e ottenere un quadrato di colore uniforme.»

«Uhm.»

«In primavera, pensavo, pregustando le future partite, il rigirare i pietroni non ci sarebbe pesato... »

«Pietroni? Ma che razza di caselle hai comprato?»

«...mentre in autunno, doverli rigirare per l'inverno sarebbe molto triste. E quindi ho pensato di riprogrammare RUDI.»

«Non era meglio riprogrammarti il cervello? Senti, ho capito che adesso mi aspetta una sudata epocale, vuoi almeno avere la decenza di non prospettarmi le future?»

«Doc, finché non saprai cogliere le occasioni di crescita intellettuale e matematica che la vita quotidiana ti offre, non raggiungerai mai la saggezza. Ascolta, ho inserito in RUDI un programma semplicissimo: definisce un rettangolo sulla scacchiera con lati di misura intera, poi capovolge tutti i pietroni di quel rettangolo; poi continua, definendo un altro rettangolo, sempre a lati interi, e ne rigira tutti i pietroni, e così via. Si ferma quando la scacchiera è tutta dello stesso colore.»

«Oh... ma allora la cosa cambia! Mi stai dicendo che sarà RUDI a fare il lavoro per noi?»

«Ma figurati... non è mai stato granché, come forza lavoro. E poi gli ho dovuto togliere le parti meccaniche per far posto al modulo di intelligenza artificiale, no? È per quello che adesso ha l'aria un po' rimbambita: anche se ha trovato velocemente un modo per mettere a posto i pietroni, adesso sta cercando di dimostrare che è il metodo più veloce.»

«Insomma lui si diletta in dimostrazioni di ottimizzazione, e noi sudiamo?»

«Ehm... pensavo che potevi divertirti solo tu, con la parte operativa dell'assemblaggio scacchiera. Sai, il povero RUDI sta procedendo con il metodo esaustivo, ci vorranno eoni, se non gli do una mano. Invece, se gli mostro che sono comunque necessarie un certo numero di mosse, il più sarà fatto. Di conseguenza...»

«Di conseguenza è meglio se lo riprogrammi ancora una volta: fagli calcolare la probabilità che nei prossimi cinque minuti smettano di funzionare nello stesso istante sia la sua intelligenza artificiale sia la tua intelligenza naturale. E se RUDI ti fornisce un risultato diverso da uno, allora ti assicuro che c'è un grosso errore di programmazione.»

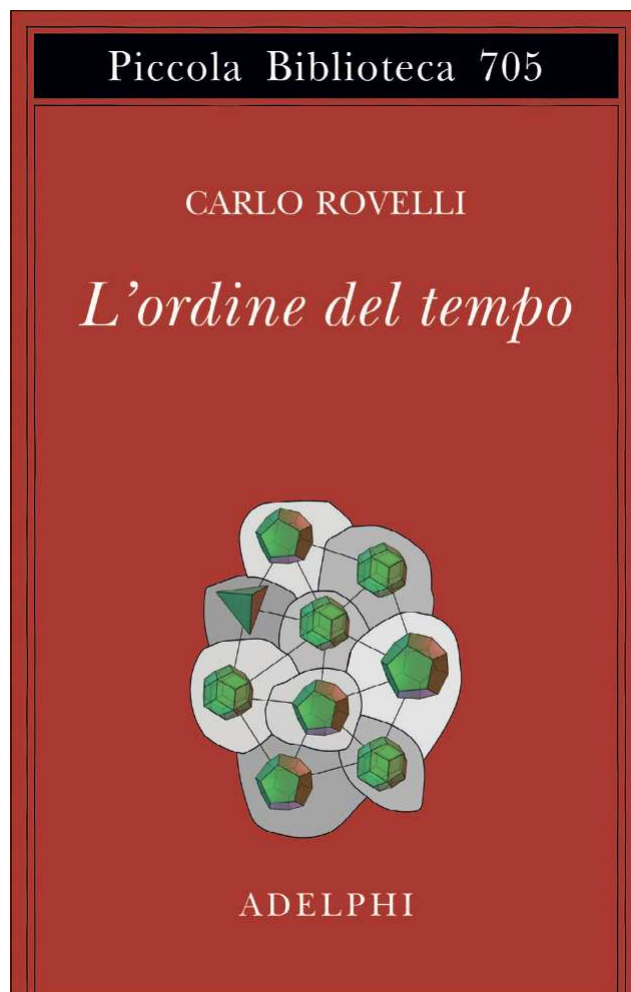
Alle sorgenti del tempo

L'ordine del tempo
di Carlo Rovelli
Adelphi, Milano, 2017, pp. 207 (euro 14,00)

«E sono convinto ormai da molte lune dell'inutilità irreversibile del tempo», cantava Rino Gaetano a metà degli anni settanta. Pochi anni prima, ad agosto 1967, dall'altra parte dell'oceano, John Wheeler e Bryce De Witt, tra i più autorevoli esploratori dei territori al confine tra fisica relativistica e fisica quantistica, avevano estromesso per la prima volta la variabile tempo da un'equazione. Carlo Rovelli tributa un intenso omaggio a quelli che definisce i suoi «padri spirituali» in una sorta di pausa tra riflessione e ricordo situata al centro del suo libro. Una pausa che si concede in cima alla montagna su cui ci ha condotto in un percorso di sottrazione progressiva, nel quale - come fossero case, alberi, vegetazione che durante la salita scompaiono alla vista - tutte le caratteristiche che siamo soliti associare al tempo si sono dileguate, lasciandoci in un paesaggio nudo battuto solo dal vento.

Il nuovo libro di Rovelli, dopo il successo planetario delle *Sette brevi lezioni*, tenta la sfida forse più ambiziosa, fare i conti con il tempo, cercando di coniugare i disorientanti risultati a cui è giunta la fisica con gli ineludibili interrogativi che suscita l'esperienza di ogni individuo umano con il tempo. E lo fa con una sorta di metodo baconiano, dedicando la prima metà del libro a una *pars destruens* nella quale demolisce gli *idola* del senso comune (ma anche di tanti filosofi e scienziati dei secoli scorsi): l'idea che il tempo sia unico, dotato di una direzionalità privilegiata, e che scorra indipendentemente dalla realtà delle cose.

La descrizione di questo sfaldarsi del tempo con la crescita della conoscenza scientifica è mirabile, per la notevole capacità dell'autore di usare parole ricercate e trovare immagini semplici e felici. Per esempio, parlando di termodinamica e delle intuizioni geniali di Ludwig Boltzmann, paragona la nostra visione di un bicchiere d'acqua a quella della Terra vista dalla Luna. Di tutto il nostro brulicare sul pianeta dal nostro satellite non si vede nulla, solo una biglia azzurra. E similmente la nostra visione degli incessanti moti molecolari nel bicchiere è molto grossolana, fortemente sfocata, tanto che ci fa considerare alcune configurazioni come privilegiate e vedere un fluire dal passato al futuro che non è intrinseco alla realtà. È uno dei colpi bassi al nostro senso comune a cui la fisica ci ha abituato con i suoi sviluppi dall'inizio del Novecento, che Rovelli ripercorre, dalla rivoluzione einsteniana fino alla gravità quantistica a *loop* di cui è uno degli ideatori. Questo lungo *excursus* aiuta a comprendere che la realtà è fatta di eventi interconnessi, e non di cose ordinate sullo sfondo del fluire unico del tempo. Giunti sulla cima di questo paesaggio nudo senza tempo, inizia quella che potremmo definire la *pars construens* del cammino di Rovelli, che cerca di rispondere alla domanda rimasta aperta: se nella dinamica della realtà il tempo non esiste, che cos'è quello che esperiamo noi in ogni istante della nostra vita?

Qui il percorso si fa un po' più accidentato, ma anche più affascinante, perché è come trovarsi di fronte a un crocevia di sentieri diversi che convergono verso un orizzonte unico. Per capire il cambio di prospettiva è utile l'analogia con la nostra visione dell'universo: per millenni, guardando la volta celeste, abbiamo pensato che fosse lui a girarci intorno, poi abbiamo capito che siamo noi a muoverci. Con la freccia del tempo potrebbe essere successo qualcosa di simile: vediamo una direzione tra passato e futuro, a partire da quello che consideriamo lo stato iniziale a bassa entropia dell'universo, che poi cresce nel tempo, perché lo guardiamo da un particolare punto di vista. Siamo vittime insomma di un effetto di prospettiva.

Alla ricerca delle «sorgenti del tempo» Rovelli ragiona sulle acquisizioni recenti delle neuroscienze, e poi dialoga con la filosofia (da Husserl a Reichenbach ai filosofi contemporanei), con la letteratura (da Proust a Hofmannsthal), con i classici della spiritualità (da Ildegarda di Bingen ai testi buddhisti), in un giro d'orizzonte dei saperi e delle sensibilità che possano regalarci le parole giuste per parlare del tempo.

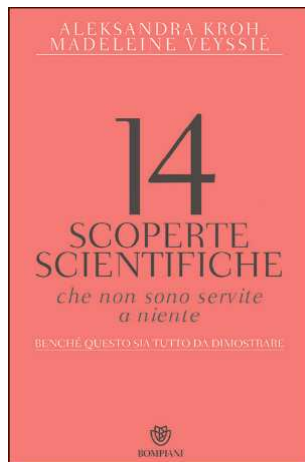
Marco Motta

La lunga strada verso il Pianeta Rosso

Come vivremo su Marte
di Mary Roach
il Saggiatore, Milano, 2017,
pp. 346 (euro 22,00)

A ottobre 2016 sono stati in tanti a seguire le opposte notizie dalla missione ExoMars. Da una parte si gioiva perché la sonda Trace Gas Orbiter era entrata in orbita attorno a Marte e dall'altra si piangevano le sorti del *lander* Schiaparelli, che, invece di atterrare sul suolo marziano, si era schiantato sulla superficie. Mentre si infrangevano le speranze per il lander e si attendevano le prime immagini scattate dal modulo in orbita, molti avranno pensato a quello che, dopo la conquista della Luna, è stato un obiettivo per l'astronautica mondiale: portare esseri umani su Marte. Era stata appena impressa la prima orma sul nostro satellite che già ci si domandava quando realizzare questo sogno, compiendo un altro «piccolo passo per un uomo, un gigantesco balzo per l'umanità».
Che cosa ciò comporti ai fini pratici non è sempre chiaro al grande pubblico e questo libro ci viene in soccorso rendendo concrete le innumerevoli difficoltà dell'esplorazione dello spazio. Ogni capitolo si sofferma su un problema logistico e sulle possibili soluzioni, ma, invece dei tecnicismi, l'autrice, giornalista scientifica e scrittrice, preferisce servirsi del suo caratteristico *sense of humour* e di aneddoti che si ricordano facilmente. Tra pazienti astronauti giapponesi valutati dalla capacità di realizzare mille perfetti origami e problemi nel gestire le più elementari (e meno eleganti) funzioni corporee; tra precarie condizioni igieniche e stress dovuto alla convivenza forzata, si arriva alla domanda centrale, che chiude l'ultima sezione: ne vale la pena? La risposta dell'autrice è un sicuro sì, con motivazioni che ricordano quelle dell'Ulisse dantesco: una sfida ai propri limiti per vedere e toccare nuovi mondi.

Anna Rita Longo

Il premio «ignobile» che aiuta ad amare la scienza

14 scoperte scientifiche che non sono servite a niente
di Aleksandra Kroh e Madeleine Veyssié
Bompiani, Milano, 2017,
pp. 348 (euro 13,00)

Andre Geim, pare, è orgoglioso dell'Ig Nobel vinto nel 2000 per aver fatto levitare una rana quanto del Nobel ottenuto dieci anni dopo per gli esperimenti sul grafene, un materiale bidimensionale. Quella dello scienziato russo è solo una delle storie che ci propongono le autrici, facendoci conoscere il dietro le quinte del gran gala che ogni anno premia scoperte stravaganti, degne appunto dell'Ig Nobel. Altra storia, per esempio, è quella di Jacques Benveniste di cui raccontano i «legami occulti tra scienza, denaro e stampa»: la memoria dell'acqua vi dice niente? *Deus ex machina* è Marc Abrahams che si fa beffe «con intelligenza, di sua maestà la scienza». Rendendola spassosa, con la complicità degli stessi scienziati. Kroh e Veyssié gli rimproverano però di non fare anche adeguatamente riflettere.
Allora vogliono farlo loro, così attingono dal vasto repertorio delle ricerche improbabili, ne selezionano 14, le contestualizzano e, illustrando il modo di procedere dei ricercatori, ci invitano a riflettere sul loro reale valore e a confrontarci con il metodo scientifico. Risultato? Non sempre le ricerche che sembrano non servire a niente sono inutili. Come lo studio di Basile Audoly e Sébastien Neukirch, premiati per aver spiegato perché, quando vengono curvati, gli spaghetti crudi si rompono in più di due pezzi. Questione a cui si era interessato anche Richard Feynman e che va oltre le sorti di una manciata di pasta cruda. Nello studio delle deformazioni dei corpi solidi per effetto di forze esterne, gli spaghetti sono un esempio di asta flessibile, così, avendo risolto l'enigma della loro rottura, i due fisici sono giunti a un risultato più generale che si può applicare al pilone di un ponte, alla canna da pesca o a fratture ossee.

Simona Regina

Le tante declinazioni del concetto di rete

Il concetto di rete è ormai pervasivo dell'esperienza quotidiana di ciascuno di noi. Da quelle sui social network alle reti di relazioni con esseri umani in carne e ossa alle reti usate in medicina per descrivere fenomeni epidemiologici. E proprio al concetto di rete è dedicata la quattordicesima edizione del Festival della Mente che si svolge a Sarzana dall'1 al 3 settembre. Nell'incantevole comune in provincia di La Spezia, 65 relatori italiani ed esteri, si confronteranno sul tema della rete analizzato da diversi punti di vista, grazie a 41 appuntamenti tra incontri, workshop e spettacoli.

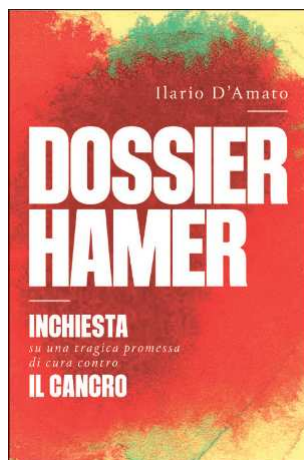
Cortesia Festival della Mente

Il festival dedicato alla creatività e alla nascita delle idee sarà aperto da Elena Cattaneo, che illustrerà la sua esperienza di ricerca sulla malattia di Huntington, in particolare sullo sviluppo di reti di scienziati che collaborano allo studio della patologia e di reti sociali che si formano attorno ai malati. Il matematico Paolo Zellini e lo scrittore Marco Malvaldi analizzeranno la rete come struttura matematica; lo psicoanalista Massimo Recalcati indagherà su tabù e sviluppo delle reti sociali. Questi sono solo alcuni dei tanti appuntamenti, per tutte le informazioni: http://www.festivaldellamente.it. (*cb*)

Alieni
Jim Al-Khalili (a cura di)
Bollati Boringhieri, Torino, 2017,
pp. 240 (euro 22,00)

Cercando la vita, sotto qualunque forma

Nel 1981, Francis Crick pubblicò un libro intitolato *L'origine della vita*, in cui cercava di dare una risposta scientifica alla domanda: come è apparsa la vita? «L'origine della vita – scriveva – sembra quasi un miracolo tante sono le condizioni che devono essere soddisfatte perché il meccanismo si metta in moto». Sottotitolo: la vita potrebbe essere un *unicum*, un campione statistico pari a uno, e perciò non ha molto senso andare a cercarla altrove nell'universo. All'epoca la pensavano come lui, per esempio, il biologo George Simpson, che liquidava il programma di ricerca SETI come «una scommessa in contrasto con la storia», e Jacques Monod, che nel suo libro *Il caso e la necessità* concludeva che «l'uomo finalmente sa di essere solo nell'immensità indifferente dell'universo».
Oggi, dopo la scoperta di molti esopianeti che si trovano nella cosiddetta «zona abitabile», si è fatta strada l'idea che Crick e compagnia non avessero tutte queste ragioni. Rimane però del tutto valida la domanda sull'origine della vita, perché nonostante vi si siano dedicate generazioni di scienziati non abbiamo ancora capito come si sia passati da biomolecole disorganizzate a cellule e poi a organismi via via più complessi. I capitoli di Andrea Sella (sull'emergenza della complessità) e Nick Lane (sulla biochimica) fanno chiarezza su quello che sappiamo della chimica dell'origine della vita. Lo zoologo Matthew Cobb, invece, si dedica alla probabilità che esistano o meno civiltà aliene, mentre la *space scientist* Monica Grady si preoccupa di analizzare le questioni relative a Marte («in un libro sugli alieni, non può mancare un capitolo su Marte»), in un caleidoscopio di contributi tra il serio e il divertito messo insieme da Jim Al-Khalili, fisico teorico e noto divulgatore, raccogliendo in un solo volume le diverse risposte alla domanda: gli alieni esistono?
Non si tratta solo di smontare le più disparate teorie sull'esistenza degli UFO o degli omini verdi, come fa con precisione e ironia lo psicologo esperto di paranormale Chris French, o di passare in carrellata come l'immaginario collettivo della fantascienza si sia immaginato gli alieni (lo fanno Ian Stewart nella letteratura e Adam Rutherford nel cinema), bensì di cercare di fornire una stato dell'arte del lavoro che astrofisici, astrogeologi, astrobiologi e tanti altri «astroqualcosa» svolgono per rispondere alla domanda sull'esistenza degli alieni, contribuendo così ad allargare le nostre conoscenze sull'universo e su di noi. Che è quello a cui servono le domande.

Marco Boscolo

Dossier Hamer
di Ilario D'Amato
Mondadori, Milano, 2017,
pp. 218 (euro 18,00)

La «nuova medicina» che uccide i pazienti

Non è mai stata una questione scientifica. Piuttosto, la diffusione della cosiddetta «Nuova Medicina Germanica» ha a che fare con la cronaca, la psicopatologia e la sociologia. Ryke Geerd Hamer, dopo l'assassinio del figlio, è colpito da un tumore ai testicoli. Si opera secondo le indicazioni dei medici, guarisce, ma inizia un percorso fatto di visioni, convinzioni dogmatiche, problemi giudiziari, sofferenza (altrui). Il suo nuovo approccio ai tumori, che guadagna notorietà all'inizio degli anni ottanta, è basato sull'idea che queste patologie siano dovute a «conflitti» interiori, da interpretare e risolvere. Ogni ricorso alla medicina scientifica è vietato. Nel 1986 Hamer è radiato dall'Ordine dei medici tedesco, perché in una clinica abusiva da lui diretta muoiono decine di pazienti: chi nell'istituto, chi in ospedale dopo essere stato «scaricato» quando le condizioni erano diventate allarmanti. Hamer non si ferma: continua a propagandare le sue teorie in Austria, per poi spostarsi in Francia e Spagna (dopo diverse condanne penali). Scontate le pene, è perseguitato in Germania per antisemitismo: decide quindi di andare in Norvegia, fuori dall'Unione Europea, dove ha continuato a sostenere le sue idee e con ogni probabilità a ricevere pazienti fino alla sua morte il 2 luglio 2017.
Il libro di D'Amato, che cura anche il sito www.dossierhamer.it, racconta i fatti. Non è una lettura facile: la sofferenza dei pazienti, riempiti di false speranze, è enorme, e le emozioni dei lettori sono aggravate dalla rabbia nei confronti di chi, in buona o cattiva fede, spinge i pazienti verso questa pseudoterapia. Il libro non risparmia nulla, né sul dolore, né su nomi e cognomi: sono chiamati in causa i «guaritori» che seguono Hamer (Marco Pfister, la pianista Giovanna Conti, le associazioni ALBA e La Fonte, per esempio), sono descritti i casi clinici in cui gli hameriani non hanno guarito pazienti che avrebbero potuto curarsi con successo con la medicina convenzionale, si raccontano i problemi giudiziari dei medici (convenzionali) che applicano la Nuova Medicina Germanica.
Non c'è scienza: non esiste un articolo scientifico da citare, non esiste un caso clinico di guarigione da esibire. E non c'è etica nei confronti dei pazienti, spesso colpevolizzati e non messi in grado di prendere decisioni autonome. Nella pratica, l'approccio di Hamer è una religione, infondata, che necessita di fede da parte del suo pubblico. Questo libro – molto documentato, con ricca sezione di riferimenti e i cui proventi andranno in parte in donazioni a due charity – è forse un piccolo ma necessario mezzo per evitare che la fede in Hamer si diffonda ulteriormente.

Mauro Capocci

Riprodurre la realtà

Una mostra in corso a Firenze ripercorre la storia delle origini della fotografia scientifica dai primi tentativi con camera oscura fino agli inizi del XX Secolo

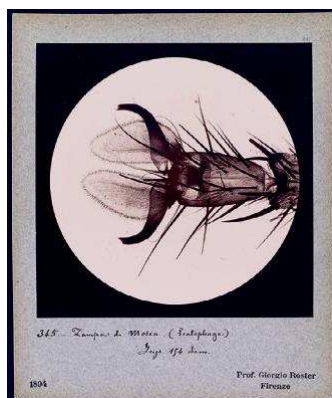
L'invenzione della fotografia si fa risalire al 1839, quando il fisico-chimico francese Louis-Jacques-Mandé Daguerre propose una tecnica per produrre immagini riprese attraverso un obiettivo grazie all'azione della luce sullo strato d'argento applicato su una lastra di rame e reso sensibile mediante vapori di iodio. Presentata per la prima volta in una riunione congiunta dell'Académie des Sciences e dell'Académie des Beaux-Arts di Parigi dall'astronomo François Jean Dominique Arago, la tecnica divenne poi celebre con il nome di «dagherrotipia», dal nome dell'inventore. Nonostante vi fossero stati altri tentativi di realizzare strumenti per riprodurre il più fedelmente possibile quello che l'occhio vedeva, fu solo da quel momento che la «riproduzione oggettiva» del reale iniziò a diffondersi, avviando non solo un importante mutamento culturale, ma anche un nuovo modo di fare scienza.

Nella seconda metà dell'Ottocento la fotografia divenne uno strumento fondamentale per documentare la realtà e produrre risultati in diversi ambiti scientifici, dall'astronomia alla biologia. In Italia, la dagherrotipia e le tecniche fotografiche successive trovarono un importante centro di valorizzazione a Firenze, dove nello stesso anno dell'invenzione di Daguerre venne fatta la prima presentazione di quella tecnica rivoluzionaria e dove, su iniziativa di importanti scienziati, come Giorgio Roster (*al centro nella foto qui in alto*), e fotografi professionisti, come Vittorio Alinari, venne fondata nel 1889 la Società fotografica italiana.

Adesso, una mostra allestita presso il Museo Galileo di Firenze e intitolata *Immagini della scienza* ripercorre la storia delle origini della fotografia scientifica, a partire dai primi tentativi cinquecenteschi di pittura con la camera oscura fino ad arrivare ai primi anni del XX secolo. L'esposizione propone infatti macchine fotografiche (escluse dall'esposizione permanente), libri e fotografie tratte dalle collezioni del museo. Fra gli strumenti in esposizione spiccano una camera oscura portatile, una macchina per dagherrotipi e il grande «teleobiettivo» di Roster (datato 1885), con cui lo scienziato-fotografo fiorentino compose vedute panoramiche incredibilmente dettagliate. È inoltre possibile partecipare a laboratori didattici sulle antiche tecniche fotografiche.

Emiliano Ricci

Cortesia Museo Galileo (*tutte le foto in questa pagina, 5*)

Tra gli strumenti esposti spiccano una macchina per dagherrotipi (*in alto a sinistra*) e una camera oscura portatile (*sotto*), entrambe del XIX secolo. In alto a destra, fotocamera Speed Graphic (1912-1927); a fianco, una zampa di mosca ripresa da Roster nel 1894.

Dove & quando:

Immagini della scienza
Dal 20 giugno al 24 settembre
Museo Galileo, Firenze
Info: http://mostre.museogalileo.it/immaginidellascienza

La trama dei ricordi

di Alcino J. Silva

Dopo vent'anni di ricerche, una tecnologia rivoluzionaria sta aiutando i neuroscienziati a svelare i meccanismi fondamentali sfruttati dal cervello per collegare i ricordi nella vasta distesa spaziale e temporale, stabilendo sequenze intricate di memorie che ci aiutano a prevedere ciò che potrebbe accadere e a comprendere meglio il mondo intorno a noi.

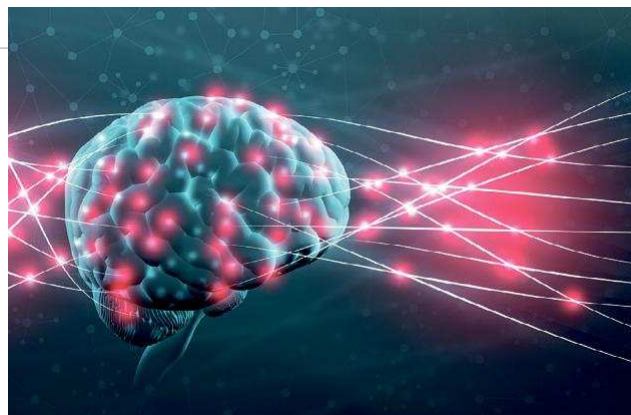
Buchi neri dal principio del tempo

di Juan García-Bellido e Sébastien Clesse

I primi buchi neri potrebbero essere nati subito dopo il big bang, quando tutto era una nebbia fitta e ribollente di particelle fondamentali, modellando la struttura dell'universo in evoluzione e in espansione. Non emettendo luce, sarebbero un candidato naturale, ma difficile da rilevare, per la materia oscura.

Dossier: Le città sostenibili

di William McDonough, Michael E. Webber, Carlo Ratti e Assaf Biderman

Le città ospitano oltre metà della popolazione mondiale, esercitando una pressione crescente sul pianeta. Ma se fossero progettate per sfruttare meglio energia, acqua, cibo e minerali, come mostrano gli interventi di questo dossier, potrebbero salvare la Terra.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Lucia Realacci
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.
Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - luglio 2017

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief: Mariette DiChristina; *Executive editor*: Fred Guterl; *Managing Editor*: Ricki L. Rusting; *Board of Editors*: Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong, David Biello, Larry Greenemeier, Ferris Jabr, John Matson

President Steven Inchcoombe; *Executive vice president*: Michael Florek; *Vice president and associate publisher*: Michael Voss; *Design Director*, Michael Mrak

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Elisa Dalgo: *Nuovi indizi sulla SLA;* Eva Filoramo*: I vichinghi scomparsi della Groenlandia;* Daniele Gewurz: *Il multiverso quantistico, La grande eclissi di Sole del 2017, 1000 di eclissi di Sole;* Laura Servidei: *Ecco perché Nemo si perde;* Alfredo Tutino: *Come fare un'IA più umana.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
SOMEDIA S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Tel. 199.78.72.78 (0864.256266 per chi chiama da telefoni cellulari. Il costo massimo della telefonata da rete fissa è di 14,37 cent di euro al minuto più 6,24 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Per chiamate da rete mobile il costo massimo della chiamata è di 48,4 cent di euro al minuto più 15,62 cent di euro di scatto alla risposta (iva inclusa). Fax 02 26681991.
Abbonamenti aziendali e servizio grandi clienti
Tel. 02 83432422; fax 02 70648237;
mail grandiclienti@somedia.it

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

FIEG

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8286 del 3/2/2017

Maxiphoto/iStock (*cervello*); Easyturn/iStock (*grattacieli*)